



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Nova metodologia de execução do ensaio SCPTu com avaliação da influência da fonte sísmica quanto à sua dimensão e afastamento

Fernando José Paiva e Silva



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Nova metodologia de execução do ensaio SCPTu com avaliação da influência da fonte sísmica quanto à sua dimensão e afastamento

Fernando José Paiva e Silva

1980865

Projecto apresentado ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente, realizado sob a orientação do Mestre Jorge Cruz do Núcleo de Geotecnia da Direcção de Fundações e Geotecnia da Mota-Engil e do Professor Adjunto Doutor Paulo Meixedo do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.

Júri

Presidente

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé
Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Mestre Jorge Miguel Saraiva Gonçalves Cruz
Departamento de Geotecnia e Fundações, Mota-Engil SA

Mestre Eduardo Castro Neves
Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção, Centro de Formação Profissional da Indústria da Construção Civil e Obras Públicas do Norte (CICCOPN)

Dedico esta tese às minhas irmãs e à minha mãe por me apoiarem e incentivarem a um dia ser alguém mais do que mais um.

Agradecimentos

São os devidos agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma, directa ou indirectamente, participaram na elaboração deste projecto.

Ao orientador Professor Adjunto Doutor Paulo Meixedo do Departamento de Engenharia Geotécnica e Geoambiente do Instituto Superior de Engenharia do Porto, pela sua compreensão e pelo seu apoio.

Ao Jorge Cruz do Núcleo de Geotecnia da Mota-Engil, obrigado.

Ao Doutor Nuno Cruz e Doutor Carlos Rodrigues, pela amizade, apoio, toda a sabedoria e ensinamento que me transmitem e a todos que colaboram e convivem com eles.

À equipa do estaleiro de Canelas da Mota-Engil, o Mike Lopes, o Ricardo Rocha, o Nuno Oliveira, a Denise Silva, a Patrícia Vieira, a Cárin Mateus, o Leonel Conde, o Francisco Silva, o Miguel Meireles, a Carmo Pinto e o Luís Povoas por proporcionarem que o trabalho seja mais simpático de se executar.

À Sandra por aturar a minha má disposição nas manhãs que sucedem às noites longas.

A todos aqueles em que os nomes não aparecem, mas não estão nem nunca serão esquecidos.

Palavras-chave

SCPTu, CPTu, Sísmica, metodologia, Onda S

Resumo

O objectivo deste trabalho consiste na determinação das Ondas de Corte, onda S, através de uma nova metodologia de ensaio do piezocone sísmico, SCPTu.

A nova metodologia adoptada de aquisição de dados, consiste na aquisição da onda de corte no movimento ascendente de remoção de varas, após execução do já conhecido ensaio CPTu, ao invés da tradicional aquisição, no movimento descendente, previamente ao acréscimo de nova vara.

Além da introdução de uma nova metodologia de aquisição sísmica, tentou-se avaliar a influência da dimensão da fonte geradora da onda de corte e a influência do afastamento das mesmas ao ponto de cravação, do ensaio de penetração estática mencionado.

Na avaliação das influências foram usadas três fontes de madeira de secção rectangular, com uma chapa de ferro a topo e diferenciadas entre si pelas dimensões de 1m, 2m e 3m e afastamentos até 4m.

Keywords

SCPTu, CPTu, Seismic, methodology, S Wave

Abstract

This work consists in determinate Shear Waves, S wave, through a new methodology in seismic piezocone, SCPTu.

The new adopted methodology to acquire data, consists in acquire shear wave in ascendant movement, instead to the traditional acquisition, in descendent movement, just before changing the rod.

In addition to the new methodology of seismic data acquisition, i tried to evaluate size influence of the seismic source and the distance of source to the point of spiking of this in situ static test.

To evaluate these influences were used 3 rectangular wood sources, with an iron plate at tops, with dimensions of 1m, 2m and 3m, and a distance up to 4m.

ÍNDICE GERAL

1.	Introdução.....	3
1.1.	Breve introdução temática.....	3
1.2.	Influência das Propriedades do Meio na Propagação de ondas – Maciços terrosos	4
2.	Teoria de propagação das ondas sísmicas	7
2.1.	Velocidade das Ondas	10
2.2.	Impedância acústica e coeficiente de reflexão	13
2.3.	Perdas de Energia.....	14
3.	Ensaio CPTu e SCPTu	19
3.1.	Breve introdução do equipamento	19
3.2.	Ensaio CPTu	20
3.2.1.	Saturação do elemento poroso do piezocone	22
3.3.	Ensaio SCPTu	23
3.4.	Determinação de parâmetros do CPTu	26
3.4.1.	Parametrização baseada nos ensaios CPTu	28
3.4.2.	Características de resistência ao corte dos materiais granulares	29
3.4.3.	Características de resistência ao corte dos materiais coesivos.....	30
3.4.4.	Módulo de distorção inicial (G_0).....	31
3.4.5.	Módulo de deformabilidade (E')	32
3.4.6.	Módulo de compressão unidimensional (M)	32
4.	Área de estudo	37
4.1.	Introdução.....	37
4.2.	Enquadramento Geológico	38
4.3.	Equipamento de Ensaio.....	38
5.	Avaliação das ondas S em fase ascendente	45
5.1.	Procedimento de execução no ensaio SCPTu-1	45

5.1.1. Interpretação de ondas sísmicas pelo Método da Correlação Cruzada (“Cross-Correlation technique”)	49
5.1.2. Interpretação de ondas sísmicas pelo Método da Polaridade Inversa (Reverse Polarity technique)	49
5.1.3. Análise das velocidades das ondas de corte registradas no ensaio	50
5.1.4. Caracterização das formações atravessadas	53
6. Avaliação da influência da dimensão da fonte	59
6.1. Ensaio SCPTu-2	59
6.1.1. Análise das velocidades das ondas de corte	61
6.1.2. Caracterização das formações atravessadas	69
7. Avaliação da influência do afastamento da fonte	75
7.1. Ensaio SCPTu-3	75
7.1.1. Avaliação das velocidades de corte	77
7.1.2. Caracterização das formações atravessadas	88
8. Conclusões	93
9. Bibliografia	95

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de propagação das ondas P (adaptado de Ricardo Rocha, 2007).	8
Figura 2 – Esquema de propagação das ondas S (adaptado de Ricardo Rocha, 2007).	8
Figura 3 – Ondas S polarizadas vertical e horizontalmente (adaptado de Ricardo Rocha, 2007).	9
Figura 4 - Esquema de propagação de ondas de Rayleigh (adaptado de Ricardo Rocha, 2007).	9
Figura 5 - Esquema de propagação das ondas Love (adaptado de Ricardo Rocha, 2007).	10
Figura 6 – Propagação da onda. Frentes de Onda (adaptado de Ricardo Rocha, 2007).	15
Figura 7 – Diferentes tipos de piezocones e posição dos elementos porosos (Mayne, 2001)	19
Figura 8 - Esquema de montagem do equipamento CPTu (Geotech)	21
Figura 9 -Esquema ilustrativo da execução do CPTu, segundo Mayne 2007	22
Figura 10 - Saturação dos anéis porosos no laboratório (esquerda) e colocação do fluido de saturação em campo (direita). (cortesia Mota-Engil)	23
Figura 11 - Saturação da câmara de medição da poro-pressão. (cortesia Mota-Engil)	23
Figura 12 - Esquema de montagem equipamento SCPTu (Geotech)	24
Figura 13 - Esquema ilustrativo execução SCPTu, para ondas de corte, segundo Mayne, 2007	25
Figura 14 - Esquema de aquisição de ondas sísmicas, segundo Mayne 2007	25
Figura 15 – Classificação proposta por Robertson (1990)	27
Figura 16 - Previsão de D_r através de q_c (Jamiolkowski <i>et al.</i> , 1985).	29
Figura 17 - Relações entre σ'_{v0} , q_c e ϕ' (Robertson e Campanella, 1983).	30
Figura 18 - Avaliação do módulo de deformabilidade drenado secante a partir do CPT para areias siliciosas (Baldi <i>et al.</i> , 1989).	32
Figura 19 – Geologia do local em estudo (Carlos Rodrigues, 2010)	38
Figura 20- Características do piezocone da Pagani (Carlos Rodrigues, 2010)	39
Figura 21 – Esquema do piezocone utilizado (Carlos Rodrigues, 2010)	39
Figura 22 – Fontes de emissão de energia usadas.	40
Figura 23 - Vista GoogleEarth com localização esquemática dos 3 ensaios realizados (Rodrigues et al, 2010)	40
Figura 24 - Valores obtidos no ensaio CPTu-1	45
Figura 25 - Interpretação dos registos do Cptu-1	47

Figura 26 – Esquema de aquisição de dados sísmicos no ensaio SCPTu-1 (adaptado de Mayne, 2007)	48
Figura 27 - Exemplo de aplicação do método da Inversão da Polaridade à avaliação da velocidade de propagação da onda de corte no ensaio SCPTu-1, entre as profundidades de 5 e 6 m.	50
Figura 28 - Valores obtidos após tratamento das velocidades de corte do SCPTu-1	51
Figura 29 - Amplitude vs tempo de chegada da onda	52
Figura 30 - Projecção dos dados do ensaio CPTu-1 sobre Carta de Robertson, 1990	53
Figura 31 - Apresentação dos valores para G_0 no ensaio SCPTu-1	55
Figura 32 - Valores obtidos no ensaio CPTu-2	60
Figura 33 - Avaliação do factor R_2 em profundidade para as 3 fontes	62
Figura 34 - Avaliação de amplitude da onda para a fonte de 2,0m.....	63
Figura 35 - Avaliação de amplitude da onda para a fonte de 1,5m.....	64
Figura 36 - Avaliação de amplitude da onda para a fonte de 1,0m.....	64
Figura 37 - Avaliação da amplitude de onda, com polarização esquerda para as 3 fontes a 8,0m de profundidade.....	65
Figura 38 - Avaliação da amplitude de onda, com polarização esquerda para as 3 fontes a 9,0m de profundidade.....	66
Figura 39 - Avaliação da amplitude de onda, com polarização esquerda para as 3 fontes a 10,0m de profundidade.....	66
Figura 40 - Avaliação da amplitude de onda, com polarização direita para as 3 fontes a 8,0m de profundidade.....	67
Figura 41 - Avaliação da amplitude de onda, com polarização direita para as 3 fontes a 9,0m de profundidade.....	67
Figura 42 - Avaliação da amplitude de onda, com polarização direita para as 3 fontes a 10,0m de profundidade.....	68
Figura 43 - Valores obtidos após tratamento das velocidades de corte do SCPTu-2, para a fonte de 2,0m ..	69
Figura 44 - Projecção dos dados do ensaio CPTu2 sobre Carta de Robertson, 1990	70
Figura 45 - Valores obtidos após tratamento das velocidades de corte do SCPTu-2, para a fonte de 2,0m ..	71
Figura 46 - Comparação das velocidades SCPTu-1 e SCPTu-2	72
Figura 47 - Valores obtidos no ensaio Cptu-3.....	76
Figura 48 - Variação das V_s em profundidade para as 4 distâncias na fonte de 2,0m	79
Figura 49 – Variação das V_s em profundidade para as 4 distâncias na fonte de 1,0m	79

Figura 50 - Avaliação de amplitude da onda para a fonte de 1,0m a 1,0m de distância.....	80
Figura 51 - Avaliação de amplitude da onda para a fonte de 1,0m a 2,0m de distância.....	81
Figura 52 – Avaliação de amplitude da onda para a fonte de 1,0m a 3,0m de distância	81
Figura 53 – Avaliação de amplitude da onda para a fonte de 1,0m a 4,0m de distância	82
Figura 54 - Avaliação de amplitude da onda para a fonte de 2,0m a 1,0m de distância.....	82
Figura 55 - Avaliação de amplitude da onda para a fonte de 2,0m a 2,0m de distância.....	83
Figura 56 - Avaliação de amplitude da onda para a fonte de 2,0m a 3,0m de distância.....	83
Figura 57 - Avaliação de amplitude da onda para a fonte de 2,0m a 4,0m de distância.....	84
Figura 58 - Avaliação da amplitude de onda a 7,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 2,0m	85
Figura 59 - Avaliação da amplitude de onda a 7,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 2,0m	85
Figura 60 - Avaliação da amplitude de onda a 7,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 1,0m	86
Figura 61 - Avaliação da amplitude de onda a 7,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 1,0m	86
Figura 62 - Evolução dos coeficientes de correlação quanto ao afastamento pelo método da correlação cruzada	87
Figura 63 - Valores obtidos após tratamento das velocidades de corte do SCPTu-3	88
Figura 64 – Projecção dos dados do ensaio CPTu-3 sobre a carta de Robertson 90	88
Figura 65 - Valores obtidos após tratamento das velocidades de corte do SCPTu-3, para a fonte de 2,0m ..	90

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Ordem de grandeza das velocidades das Ondas P e S (Lavergne, 1989)	12
Tabela 2 - Coeficientes de Reflexão entre vários meios (Sylvester e Porta, 1992)	14
Tabela 3 - Evolução do piezocone e suas potencialidades	20
Tabela 4 - Correlação entre método gráfico e numérico (Adaptado de Saraiva Cruz, 2008)	27
Tabela 5 – Avaliação α para cálculo do Módulo de deformabilidade	34
Tabela 6 - Valores das Velocidades de corte SCPTu-1	51
Tabela 7 – Tabela de parâmetros obtidos no ensaio SCPTu-1	54
Tabela 8 - Valores das Velocidades de corte SCPTu-2 para um afastamento de 2,0m	61
Tabela 9 - Tabela de parâmetros obtidos no ensaio SCPTu-2	70
Tabela 10 - Valores das Velocidades de corte SCPTu-3 para a fonte de 2,0m	77
Tabela 11 - Valores das Velocidades de corte SCPTu-3 para a fonte de 1,0m	78
Tabela 12 - Parâmetros obtidos no ensaio SCPTu-3.....	89

ÍNDICE DE FÓRMULAS

(1) - V_p por Sheriff, 1991.....	6
(2) - V_s por Sheriff, 1991.....	6
(3) - Primeira constante de Lamé, λ	7
(4) - Segunda constante de Lamé, μ	7
(5) - Coeficiente de Poisson, ν	7
(6) - Módulo de compressibilidade volumétrica, K	7
(7) - Módulo de Young, E	7
(8) - Coeficiente de Poisson em função das velocidade de corte e transversais.....	7
(9) - Impedância acústica do meio, I	9
(10) - Coeficiente de reflexão, R	9
(11) - Absorção de energia, A_x	11
(12) - Razão de atrito lateral, R_f	20
(13) - Resistência de ponta total corrigida, q_t	20
(14) - Coeficiente de poro-pressão, B_q	20
(15) - Resistência de ponta normalizada, Q_t	20
(16) - Classificação numérica, I_c	21
(17) - Compacidade relativa, D_r	23
(18) - Ângulo de atrito por Clauseu e Denver, 1995.....	24
(19) - Ângulo de atrito por Kulhawy e Mayne, 1990.....	24
(20) - Coesão.....	24
(21) - Coesão não drenada.....	25
(22) - Módulo distorcional, G_0	25
(23) - Módulo de compressão unidimensional, M	27
(24) - Proposta de Vesic (1970) para α	27
(25) - Módulo de compressão unidimensional por Kulhawy e Mayne (1990), M	28

LISTA DE SIGLAS

CPTu	-	Piezocone
SCPTu	-	Piezocone sísmico
E	-	Módulo de Elasticidade Longitudinal
λ	-	Primeira constante de Lamé
mV	-	Módulo de compressibilidade volumétrica
ν	-	Coefficiente de Poisson
V_p	-	Velocidade da onda P, ou primária
V_s	-	Velocidade da onda S, ou secundária
μ	-	Segunda constante de Lamé
ρ	-	Peso volúmico
I	-	Impedância acústica
A_x	-	Amplitude no ponto x
α	-	Coefficiente de absorção
u_1	-	Posição 1 do elemento poroso na ponteira cónica
u_2	-	Posição 2 do elemento poroso na ponteira cónica
u_3	-	Posição 3 do elemento poroso na ponteira cónica
F_c	-	Força axial gerada pela adesão
F_s	-	Fricção na manga de atrito lateral
q_c	-	Resistência de ponta
f_s	-	Atrito lateral
R_f	-	Razão de atrito lateral
q_t	-	Resistência de ponta corrigida
B_q	-	Coefficiente de poro-pressão
Q_t	-	Resistência de ponta normalizada
Ic	-	Classificação numérica
Dr	-	Compacidade relativa
ϕ	-	Ângulo de resistência ao corte
C_u	-	Coesão não drenada
G_0	-	Módulo de distorção inicial
a	-	Factor de área da ponteira cónica
U_2	-	Poro-pressão in-situ medida na posição 2
U_0	-	Pressão hidrostática medida in-situ
R^2	-	Coefficiente de correlação cruzada

1. INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

1.1. BREVE INTRODUÇÃO TEMÁTICA

A caracterização geotécnica de maciços com base em ensaios *in situ* assumiu crescente importância na caracterização geotécnica nas últimas décadas.

A sua base de utilização conta com equipamentos de ensaio de elevada resolução, que permitem a obtenção de dados referentes às formações atravessadas nas condições reais em que se encontram. Tal facto constitui uma vantagem reconhecida relativamente à caracterização laboratorial, uma vez que elimina a problemática da amostragem, cujo efeito real sobre as características mecânicas se desconhece.

Neste contexto têm surgido variadíssimos estudos sobre a aquisição de dados *in situ*, quer ao nível da evolução das ferramentas de ensaio, quer ao nível dos modelos propostos para a determinação dos vários parâmetros geotécnicos de identificação e caracterização.

Neste contexto, o trabalho realizado consiste na prospecção e caracterização geotécnica de maciços através de ensaios *in situ*, particularmente no que permite aquisição de ondas de corte (S), através de uma das ferramentas de ensaio mais utilizadas na prospecção geotécnica: o piezocone na sua vertente sísmica (SCPTu).

Tendo em conta a preocupação demonstrada pela comunidade científica na forma de obtenção dos registos sísmicos durante a execução de um ensaio SCPTu, desenvolveu-se este trabalho de investigação, cujo tema tem sido frequentemente abordado por vários autores e utilizadores do equipamento, no que respeita ao registo das ondas de corte (S).

Esta temática carece ainda de consenso generalizado quanto ao modo de utilização das fontes sísmicas, com as devidas consequências no que se refere à qualidade da emissão e recepção da onda.

Assim, no decorrer do presente trabalho de investigação, foram avaliados os factores que mais influenciam na qualidade do registo das ondas de corte (S), propondo diversas situações variáveis, e efectuando o seu registo de modo a comparar a qualidade dos resultados obtidos.

Serão abordadas alterações na dimensão da fonte a utilizar, bem como a variação do seu afastamento ao ponto de cravação.

Para além destas será também abordada a metodologia de aquisição descendente (normalizada) e ascendente (proposta). Sobre os resultados obtidos será feita uma análise detalhada, seguida de discussão orientada sob o procedimento de ensaio a adoptar para a obtenção do melhor registo de onda possível.

1.2. INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DO MEIO NA PROPAGAÇÃO DE ONDAS – MACIÇOS TERROSOS

A propagação de uma qualquer onda sísmica relaciona-se directamente com o meio em que se propaga, pelo que se torna fundamental compreender as suas características, para uma melhor compreensão do fenómeno abordado ao longo deste trabalho.

Assim, e tendo em conta que área de aplicação dos ensaios SCPTu é essencialmente em maciços terrosos, será necessário compreender as suas propriedades, de modo a poder avaliar correctamente a sua influência na propagação de ondas sísmicas.

Tais propriedades ou parâmetros que é necessário conhecer são:

- Densidade
- Permeabilidade
- Porosidade
- Propriedades elásticas do meio
- Presença de fluídos

2. TEORIA DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS SÍSMICAS

2. TEORIA DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS SÍSMICAS

Na prospecção geofísica, a geração de ondas de corte é produzida artificialmente, mediante uma fonte energética que reproduz em menor magnitude e frequência as ondas de um sismo natural.

Estas ondas, produzidas a uma pequena profundidade, impõem deformações elásticas no meio onde se encontram, na ordem dos 1m a 2m, desde o seu ponto de emissão. Nesta zona de perturbação é aplicada a teoria da propagação de ondas, que defende que a sua propagação num meio gera tensões e deformações de carácter elástico, que se traduzem em vibração das partículas em redor de um ponto de equilíbrio, voltando à sua posição inicial logo após a retirada das tensões.

A relação tensão-deformação descrita pode ser expressa pela Lei de Hooke, que permite definir os parâmetros elásticos do meio:

Módulo de Elasticidade Longitudinal ou de Young (E)

Módulo de Elasticidade transversal (segunda constante de Lamé)

Módulo de compressibilidade volumétrica (mv)

Coeficiente de Poisson (ν)

Quando um meio é perturbado pela aplicação de uma força ou energia, a relação tensão-deformação deixa o seu ponto de equilíbrio, passando a um estado de propagação sobre a forma de ondas.

Considerando um meio homogéneo, perfeitamente elástico e isotrópico para o qual se admitem dois módulos de elasticidade independentes, geram-se dois tipos de ondas:

Ondas P (Longitudinais, Primárias, Compressão). A passagem de uma onda P, é traduzida por um movimento em torno de um ponto fixo orientado segundo a direcção da propagação da onda (figura 1).

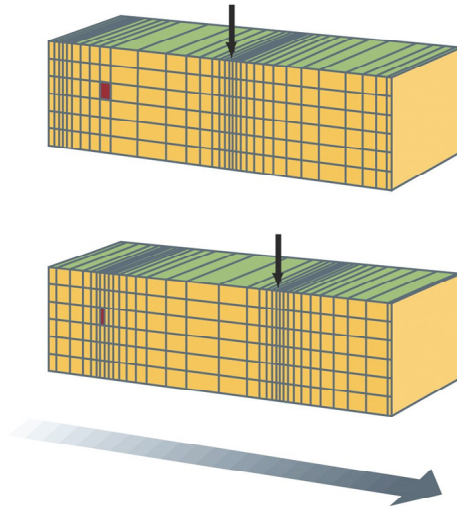


Figura 1 - Esquema de propagação das ondas P (adaptado de Ricardo Rocha, 2007).

Ondas S (Transversais, Secundárias, Corte). Movimento num plano perpendicular à direcção de propagação da onda (figura 2).

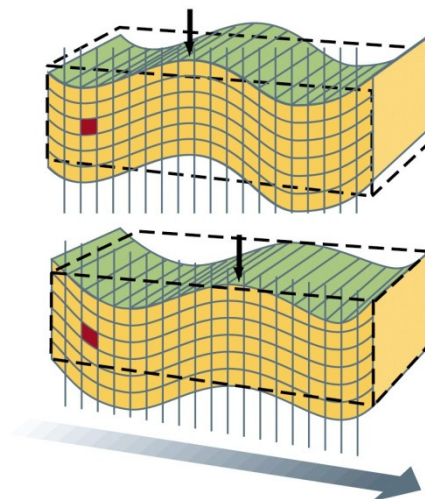


Figura 2 – Esquema de propagação das ondas S (adaptado de Ricardo Rocha, 2007).

As ondas S deformam os materiais à sua passagem sem alteração do seu volume, de forma idêntica à que acontece quando se sacode um tapete. Dado que consomem bastante energia nestes movimentos verticais, as ondas S deslocam-se com menor velocidade do que as P. Estas ondas só se propagam em meios sólidos.

Na prática, o movimento das ondas S é dividido em duas componentes (figura 3): a componente perpendicular à superfície do terreno, designada por *onda* S_V (polarizada verticalmente), e a componente paralela a *onda* S_H (polarizada horizontalmente).

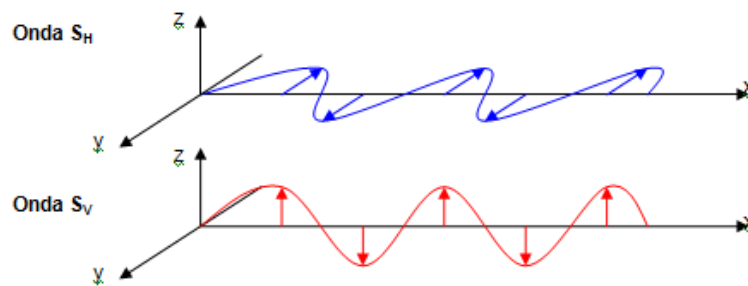


Figura 3 – Ondas S polarizadas vertical e horizontalmente (adaptado de Ricardo Rocha, 2007).

No caso de um meio não isotrópico, onde as suas propriedades elásticas variam com a direcção, é possível a geração de outras formas de ondas, que combinam movimentos longitudinais e transversais (Sheriff, 1989).

Considerando um corpo homogéneo e elástico, mas limitado a um semi-espço, a equação de onda admite outras soluções designadas por ondas de superfície ou “ground roll”:

Ondas Rayleigh, a propagação é feita ao longo de uma superfície livre de um meio. A amplitude deste tipo de ondas diminui exponencialmente com a profundidade, relativamente à superfície (Figura 4).

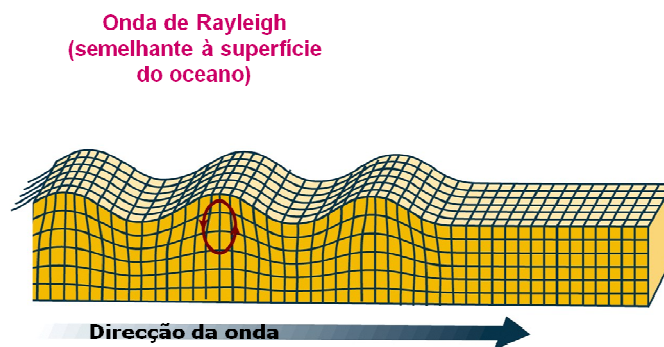


Figura 4 - Esquema de propagação de ondas de Rayleigh (adaptado de Ricardo Rocha, 2007).

As ondas Rayleigh agitam o solo segundo uma trajectória elíptica, semelhante à das ondas do mar, propagando-se em meios sólidos e líquidos.

Ondas Love, conhecidas como ondas de corte polarizadas, em que o seu movimento é descrito de forma paralela à direcção em que se propaga (Figura 5)

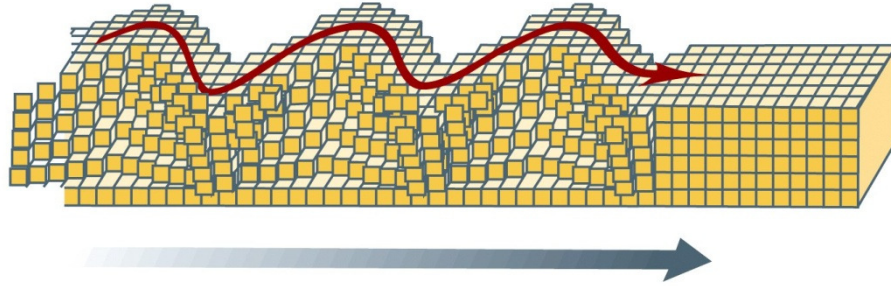


Figura 5 - Esquema de propagação das ondas Love (adaptado de Ricardo Rocha, 2007).

As ondas Love, não se propagam em meios líquidos, varrem a superfície horizontalmente, da esquerda para a direita, segundo movimentos de torção, pelo que são responsáveis pelos principais danos nas fundações dos edifícios.

2.1. VELOCIDADE DAS ONDAS

As ondas P e S, primárias e secundárias respectivamente, são reconhecidas pelas suas diferentes velocidades de propagação (tabela 1), sendo que as primárias desenvolvem velocidade superior às ondas secundárias.

As ondas P e S, primárias e secundárias respectivamente, são reconhecidas com velocidades diferentes, sendo que as primárias desenvolvem velocidade superior às ondas secundárias.

A velocidade de propagação é função das propriedades elásticas e massa volúmica do meio, desde que se propaguem num meio homogéneo, elástico e isotrópico.

Como tal, podemos descrever estas duas velocidades, segundo os parâmetros elásticos do meio em que se encontram, pelas seguintes formulações (Sheriff 1991):

$$V_p = \left[\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \right]^{1/2} = \left[\frac{K + \left(\frac{4}{3}\right)\mu}{\rho} \right]^{1/2} = \left[\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)} \right]^{1/2} \quad (1)$$

$$V_s = \left[\frac{\mu}{\rho} \right]^{1/2} = \left[\frac{E}{\rho 2(1+\nu)} \right]^{1/2} \quad (2)$$

Sendo:

$$\lambda, \text{ a primeira constante de Lamé } \left(\lambda = \left[\frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \right] \right) \quad (3)$$

$$\mu, \text{ a segunda constante de Lamé } \left(\mu = \left[\frac{E}{2(1+\nu)} \right] \right) \quad (4)$$

$$\nu, \text{ o coeficiente de Poisson } \left(\nu = \left[\frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)} \right] \right) \quad (5)$$

ρ , a massa volúmica do meio;

$$K, \text{ o módulo de compressibilidade volumétrica } \left(K = \left[\frac{\lambda+2\mu}{3\mu} \right] \right) \quad (6)$$

$$E, \text{ módulo de Young } \left(E = \left[\frac{\mu(3\lambda+2\mu)}{\lambda+\mu} \right] \right) \quad (7)$$

Através da análise destas formulações, podemos concluir que num mesmo meio, a velocidade das ondas longitudinais é superior à velocidade das ondas transversais, assim como, nos líquidos em que não exista resistência ao corte ($\mu=0$, módulo de rigidez nulo), a velocidade da onda de corte é nula, originando o valor máximo do coeficiente de Poisson ($\nu=0,5$).

O coeficiente de Poisson, pode ser expresso em função das velocidades de corte e transversais, sendo:

$$\nu = \frac{1}{2} \left[\frac{V^2 P - 2V^2 S}{V^2 P - V^2 S} \right] \quad (8)$$

Tabela 1 - Ordem de grandeza das velocidades das Ondas P e S (Lavergne, 1989)

Tipo de Materiais	Velocidade das Ondas P (m/s)		Velocidade das Ondas S (m/s)		Massa Volumica (KN/m ³)	
<i>Rocha decomposta</i>	300	700	100	300	17	24
<i>Areias Secas</i>	400	1200	100	500	15	17
<i>Areias Saturadas</i>	1500	2000	400	600	19	21
<i>Argilas</i>	1100	2500	200	800	20	24
<i>Margas</i>	2000	3000	750	1500	21	26
<i>Arenitos</i>	3000	4500	1200	2800	21	24
<i>Calcários</i>	3500	6000	2000	3300	24	27
<i>Cré</i>	2300	2600	1100	1300	18	23
<i>Sal</i>	4500	6500	2500	3100	21	23
<i>Anidrites</i>	4000	5500	2200	3100	29	30
<i>Dolomitas</i>	3500	6500	1900	3600	25	29
<i>Granito</i>	4500	6000	2500	3300	25	27
<i>Basalto</i>	5000	6000	2800	3400	27	31
<i>Carvão</i>	2200	2700	1000	1400	13	18
<i>Água</i>	1450	1500	-		10	
<i>Gelo</i>	3400	3800	1700	1900	9	

2.2. IMPEDÂNCIA ACÚSTICA E COEFICIENTE DE REFLEXÃO

A Impedância acústica de um meio (I), resulta do produto da sua massa volúmica (ρ) pela velocidade de propagação desse meio (V), que se traduz na seguinte fórmula (9)

$$I = \rho V \quad (9)$$

Quando existem meios diferentes com diferentes impedâncias acústicas, ocorre uma divisão de energia pelos diversos meios, ou seja, parte da energia desenvolvida é transmitida para o meio inferior e a outra parte reflecte nessa mesma interface.

A amplitude de reflexão nessa interface é dependente do nível de contraste das impedâncias acústicas inerentes aos próprios meios, que irá ser traduzido por um coeficiente denominado por coeficiente de reflexão (R), apresentado como:

$$R = \left[\frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} \right] \quad (10)$$

Em que $\rho_1 V_1$ expressa a impedância acústica existente no meio 1 e analogamente $\rho_2 V_2$ a impedância acústica no meio 2.

Daqui se depreende que a identificação das reflexões em meios com maiores contrastes, como por exemplo o interface entre os solos e as rochas, apresentam maiores amplitudes do que em interfaces de meios com menores contrastes, como por exemplo entre solos de diferentes composições, conforme pode ser observado na tabela 2.

Tabela 2 - Coeficientes de Reflexão entre vários meios (Sylvester e Porta, 1992)

Tipos de Interfaces	Coeficiente de Reflexão (R)	
Água – Ar	-1	
Água – Lodo	0.05	0.1
Água – Argila	0.1	0.2
Água – Silte	0.1	0.2
Água – Areia	0.3	0.4
Água – Calcário	0.5	
Lodo – Argila	0.1	
Lodo – Silte	0.1	
Argila – Areia	0.1	
Areia – Calcário	0.2	
Argila – Calcário	0.3	
Areia – Granito	0.4	

Em geral os maiores coeficientes de reflexão, são apresentados nos interfaces entre água-rocha, ou sedimentos poucos consolidados-rocha, por outro lado os menores coeficientes de reflexão, verificam-se em interfaces de sedimentos pouco consolidadas, como lodos com argilas ou argilas com areias.

2.3. PERDAS DE ENERGIA

Devido à heterogeneidade dos meios, onde as diferentes massas volúmicas e propriedades elásticas variam, contínua ou descontinuamente, verificam-se perdas de energia durante a propagação das ondas. Estas perdas de energia, implicam directamente, numa diminuição da amplitude dos sinais recebidos, assim como perda de frequência.

Esses mecanismos que influenciam nessa perda de energia durante a propagação de ondas, foram identificados como, divergência esférica, divisão de energia nas interfaces dos meios, dispersão (“Scatering”) e ainda a absorção (Steeple e Miller, 1990).

O mecanismo de perda de energia mais influente é a divergência esférica, sendo explicado pelo facto de ao longo do tempo, uma frente de onda (figura 6), tender a ocupar áreas maiores, desde o seu ponto inicial, obrigando a que a energia inicial, se distribua por essas áreas.

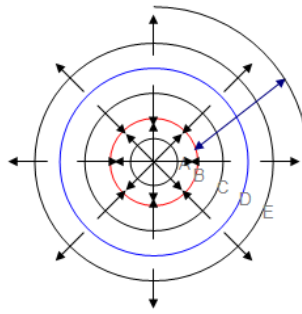


Figura 6 – Propagação da onda. Frentes de Onda (adaptado de Ricardo Rocha, 2007).

A divisão de energia pelas interfaces dos meios, é explicada pelo facto de a energia emitida, reflectir em direcção à superfície e parte dessa energia inicial se propagar para o meio seguinte, quando esta chega a esse contacto. Quando estamos em meios estratificados, a energia que chega aos níveis inferiores é relativamente mais baixa à que inicialmente foi emitida à superfície.

Outro processo que implica diminuição de energia é o denominado por "dispersão", ocorre em zonas onde os meios atravessados, apresentam heterogeneidades com dimensões da mesma ordem de grandeza no comprimento de onda emitida. A título de exemplo, temos zonas em que os meios atravessados, apresentam elevada heterogeneidade, constituídas por grandes blocos de rocha ou calhaus, ou ainda zonas com intercalações de escoadas basálticas intercaladas noutras formações (Steeple e Miller, 1990).

Por último, dos processos enumerados, temos a absorção de energia, baseada no facto de a energia ao atravessar os meios, ser convertida em calor. Este facto, traduz-se numa equação expressa por:

$$A_x = \frac{A_0 e^{-\alpha x}}{x} \quad (11)$$

Sendo:

A_x a amplitude no ponto x ,

A_0 a amplitude no ponto 0,

x a distância,

α o coeficiente de absorção.

Os valores de α normalmente varia entre 0,20 a 0,75 dB por comprimento de onda.

Isto implica que a diminuição de energia depende do comprimento de onda e que as perdas de energia são muito maiores para ondas de alta frequência do que para as de menor frequência. Sendo também que as ondas que se propagam em meios de menores velocidades, do tipo areias ou argilas, perdem energia por absorção do que em meios de velocidades maiores.

3. ENSAIO CPTU E SCPTU

3. ENSAIO CPTu E SCPTu

3.1. BREVE INTRODUÇÃO DO EQUIPAMENTO

O piezocone estático (CPTu) é um equipamento constituído essencialmente por uma ponteira cónica com 60° de ângulo de apical e 10cm^2 de área de secção e por uma manga lateral com uma área circunferencial de 150cm^2 responsável pela medição do atrito lateral. O equipamento é capaz de efectuar o registo da força axial necessária à penetração desse cone a uma velocidade constante no terreno ($2\pm 0,5\text{ cm/s}$) – (F_c) e a força axial gerada pela adesão ou fricção actuante na manga de atrito lateral (F_s).

Adicionado ainda a este conjunto, poderá estar um elemento poroso, capaz de registar a poro-pressão desenvolvida durante a cravação, que poderá estar em 3 posições distintas ou a combinação entre elas, denominadas por u_1 , u_2 e u_3 (figura 7), respectivamente, passando neste caso a ser denominado como CPTu.



Figura 7 – Diferentes tipos de piezocones e posição dos elementos porosos (Mayne, 2001)

Para além deste elemento poderá ainda incluir um outro, um sensor sísmico, capaz de efectuar os registos das ondas de corte e de compressão, passando neste caso a ser designado por SCPTu.

De seguida mostra-se uma comparação (tabela 3) da evolução do piezocone e as suas potencialidades na prospecção geotécnica.

Tabela 3 - Evolução do piezocone e suas potencialidades

	Cpt (mecânico)	Cptu (eléctrico)	SCptu (eléctrico)
Perfil do Solo	Moderada	Alta	Alta
Estrutura do Solo	Moderada	Moderada a Alta	Moderada a Alta
História de Tensões	Baixa	Moderada	Moderada a Alta
Variação das propriedades	Moderada	Alta	Alta
Propriedades mecânicas	Moderada	Moderada a Alta	Alta
Características de compacidade	Moderada	Moderada a Alta	Alta
Condições do nível da água	---	Alta	Alta
Potencial de liquefacção	Moderada	Moderada a Alta	Alta
Economia nos custos das Campanhas	Alta	Alta	Alta

A introdução da possibilidade de medição da velocidade de propagação das ondas de corte no equipamento do CPTu, tornou possível a medição da rigidez do solo ensaiado o que aumentou bastante a potencialidade deste equipamento.

A norma de ensaio mais utilizada na realização dos ensaios CPTu e SCPTU, é a norma ASTM 5778. Para além desta norma, existem ainda outras

3.2. ENSAIO CPTU

O ensaio CPTu de forma resumida corresponde à cravação de uma ponteira com área conhecida, estática e contínua, a uma velocidade constante, ligada a um sistema de aquisição de dados para posterior tratamento.

Para auxílio da cravação, são usados equipamentos mecânicos, de rodados ou lagartas, com capacidade de imprimir a cravação estática. Estes equipamentos deverão ter a capacidade de imprimir ajustes à velocidade de cravação de modo a que esta seja constante. São ainda usados equipamentos mais ligeiros que pela sua insuficiente capacidade de reacção exigem ancoragem ao terreno de modo a tornar possível a cravação estática da ponteira cónica. A correcta escolha de um equipamento de cravação, incide na capacidade de reacção que este possa oferecer aquando da cravação da ponteira.

O sistema de ensaio CPTu (figuras 8 e 9), é composto pelo trem de varas, furadas a meio por onde passa o cabo de transmissão do sinal da instrumentação alojada na ponteira. Este cabo, efectua a transmissão de dados para uma caixa de interface, que esta directamente ligada a um computador onde eles serão guardados. A esta caixa de interface, está ligada também uma outra caixa, esta de controlo de profundidade, sendo desta maneira passível de se saber, a profundidade correcta que está a decorrer o ensaio.

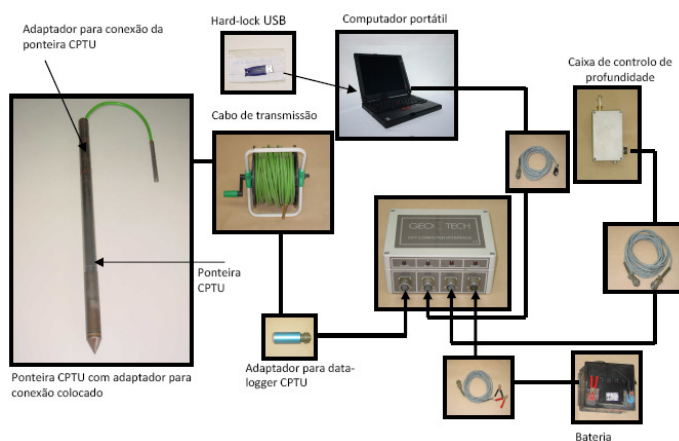


Figura 8 - Esquema de montagem do equipamento CPTu (Geotech)

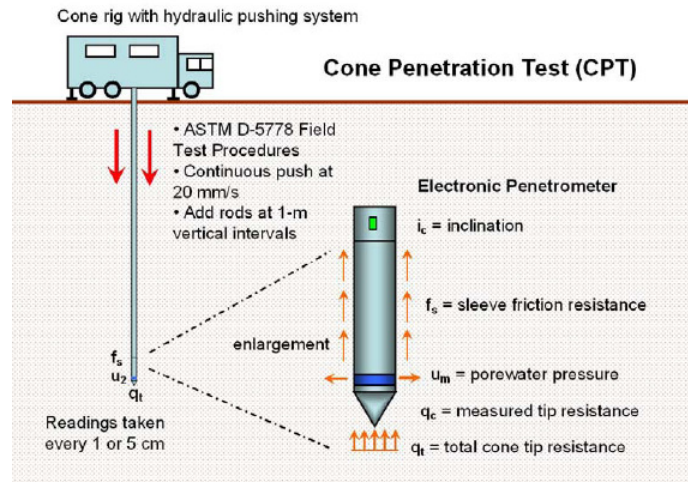


Figura 9 -Esquema ilustrativo da execução do CPTu, segundo Mayne 2007

Existem já equipamentos com capacidade de emitir os dados até à superfície pelo uso de tecnologias sem fios (wireless).

3.2.1. Saturação do elemento poroso do piezocone

O método utilizado na saturação consiste em duas partes. Uma que diz respeito à saturação prévia dos anéis porosos, que consta da impregnação com parafina líquida fina através de um sistema de vácuo que acelera o processo de saturação, conforme se ilustra na figura 10. Após a saturação os anéis são colocados em reserva, submersos em parafina.

A outra parte diz respeito à operação de troca de anel poroso, necessária à execução de um novo ensaio CPTu. Aquando desta operação, utiliza-se um dispositivo apropriado (figura 11) que é introduzido do topo do piezocone, o qual se enche de parafina submergindo-se o anel poroso previamente saturado e a ponteira cónica desenroscada.



Figura 10 - Saturação dos anéis porosos no laboratório (esquerda) e colocação do fluido de saturação em campo (direita). (cortesia Mota-Engil)



Figura 11 - Saturação da câmara de medição da poro-pressão. (cortesia Mota-Engil)

3.3. ENSAIO SCPTu

O ensaio sísmico SCPTu (esquema na figura 12), derivada do incremento de elementos (acelerómetros) na ponteira de cravação do ensaio CPTu, dispostos triaxialmente, que permitem a determinação da velocidade de propagação das ondas sísmicas de tipo S (ondas de corte) e de tipo P (ondas primárias ou compressivas) através da diferença de tempos de chegada para um intervalo de profundidade constantes.

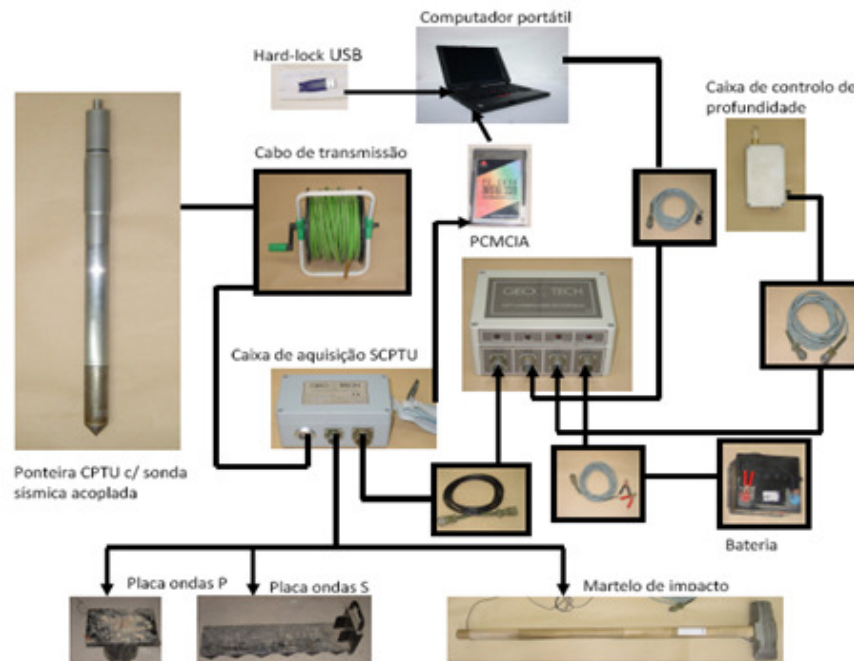


Figura 12 - Esquema de montagem equipamento SCPTu (Geotech)

O sistema de medição sísmico triaxial é composto por três acelerómetros dispostos perpendicularmente entre si (x, y, z), estes acelerómetros são de sistema 'shear' e utilizam cerâmica como elemento sensível. Têm uma sensibilidade de 100 mV/g, um alcance de frequências no intervalo de 0,5 – 10.000 Hz e uma frequência ressonante de 35 kHz.

A execução do ensaio CPTu decorre de igual modo ao descrito no ponto 3.1 mas na paragem para o incremento de mais uma vara, é normalmente efectuado o registo das ondas sísmicas. As ondas sísmicas são geradas à superfície, com recurso a fontes sísmicas para emissão de ondas S ou P (figuras 13 e 14), que se propagam até à profundidade onde se encontra a ponteira com os acelerómetros.

Estas ondas são geradas por um martelo que efectua o impacto e que está ligado às fontes por meio de um cabo eléctrico, que quando se efectua o impacto na fonte, está dá o sinal à caixa de aquisição como o tempo inicial de aquisição. No caso das ondas de corte, o impacto terá de ser efectuado horizontalmente, numa altura de queda constante, para gerar o registo sísmico e efectuado à esquerda e à direita para produzir o efeito polarizado da onda de corte.

Quando se trata de ondas de compressão o impacto é efectuado na vertical sobre a fonte sísmica em questão.

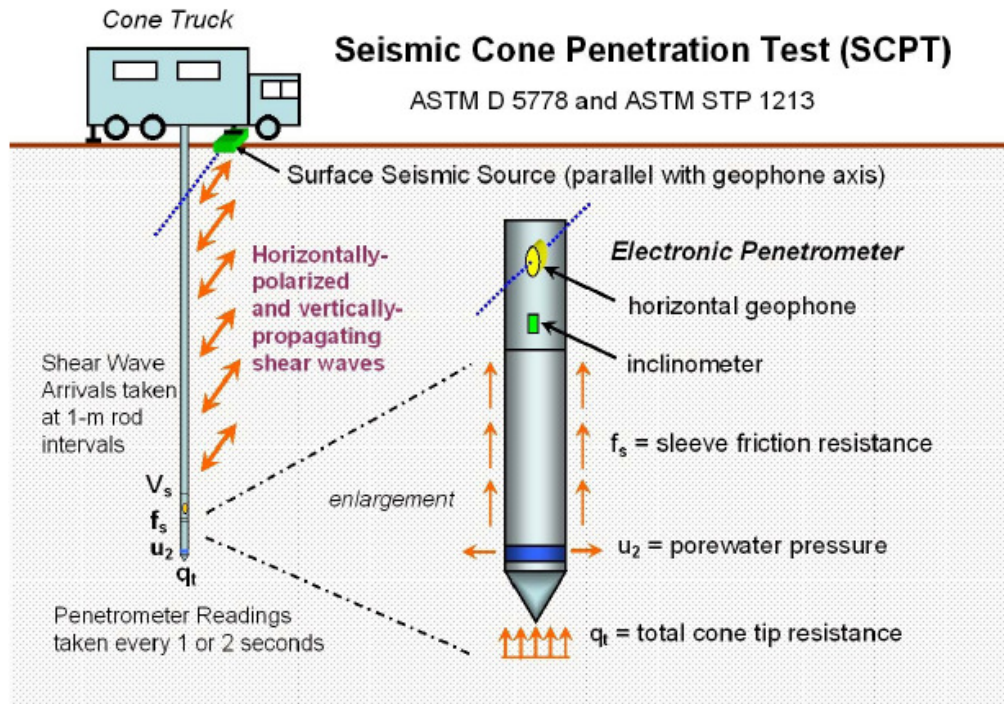


Figura 13 - Esquema ilustrativo execução SCPTu, para ondas de corte, segundo Mayne, 2007

A correcta distância da fonte ao ponto de cravação é algo que ainda não está bem definida. A prática comum do ensaio, define uma distância de 1,5m do ponto de cravação.

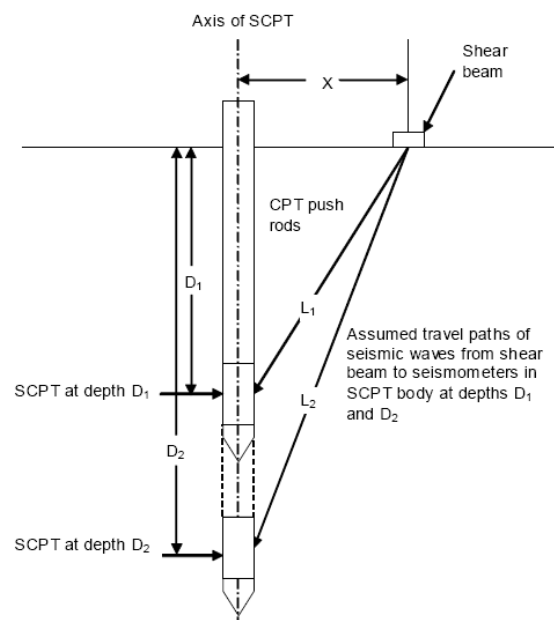


Figura 14 - Esquema de aquisição de ondas sísmicas, segundo Mayne 2007

3.4. DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DO CPTu

As medições básicas efectuadas pelo sistema constam fundamentalmente de:

- Força axial necessária à penetração do cone de secção nominal de 10 cm^2 à velocidade constante no terreno ($2 \pm 0,5 \text{ cm/s}$) – (F_c);
- Força axial gerada pela adesão ou fricção actuante na manga de atrito com área circunferencial de 150 cm^2 – (F_s);
- Poro-pressão desenvolvida durante a cravação – (u), dependendo da posição do elemento poroso, pode ser u_1 , u_2 ou u_3 ;
- Profundidade de cravação;
- Desvio da ponteira cónica em profundidade relativamente ao ponto inicial de cravação (inclinação).
-

Estas medições permitem ainda conhecer os seguintes parâmetros:

- Resistência de ponta – $q_c = F_c / A_c$, (em que $A_c = 10 \text{ cm}^2$, área da secção do cone);
- Atrito lateral – $f_s = F_s / A_s$ (em que $A_s = 150 \text{ cm}^2$, área circunferencial da manga);
- Razão de atrito, $R_f = f_s / q_c$ (em %)

(12)

- Resistência de ponta total corrigida, $q_t = q_c + u_2(1 - a)$;

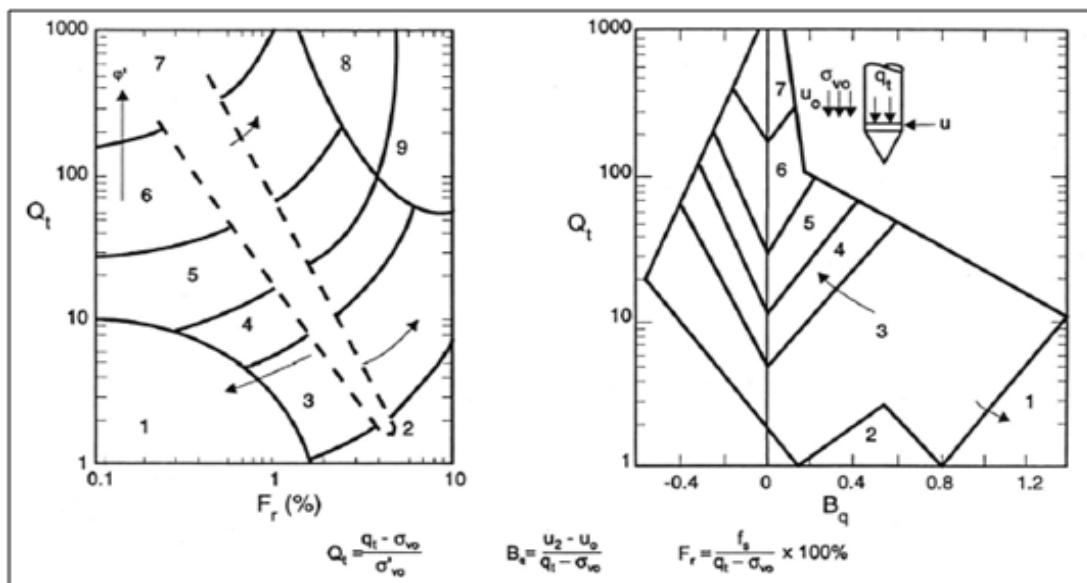
(13)

- Coeficiente de poro-pressão (B_q), $B_q = \frac{\Delta u}{q_t - \sigma_{v0}}$

(14)

Em 1990, Robertson, propôs a substituição da resistência de ponta corrida, para resistência de ponta normalizada (Q_t), (figura 15) sendo este o mais utilizado nos dias de hoje.

$$Q_T = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma_{v0}} \quad (15)$$



- | | |
|---|---|
| 1 - Solos sensíveis de granulometria fina | 6 - Areias limpas a siltes arenosos |
| 2 - Material orgânico | 7 - Areia com seixo a areia |
| 3 - Argilas a siltes argilosos | 8 - Areia a argila arenosa muito dura |
| 4 - Argilas siltosas a siltes argilosos | 9 - Solos muito duros de granulometria fina |
| 5 - Siltes arenosos a areias siltosas | |

Figura 15 – Classificação proposta por Robertson (1990)

Em 1993, Jeffries e Davies , combinou os três parâmetros normalizados, anteriormente descritos, introduzindo assim uma nova classificação, a classificação numérica (I_c), resultando na seguinte equação:

$$I_c = \{(3 - \log[Q_T (1 - B_q)]^2 + (1.5 + 1.3 \cdot \log F_r)^2\}^{0.5} \quad (16)$$

Saraiva Cruz (2008), combinou estes índices juntamente com os parâmetros de entrada na formulação de Robertson (tabela 4):

Tabela 4 - Correlação entre método gráfico e numérico (Adaptado de Saraiva Cruz, 2008)

Classificação do solo	Classificação Robertson (1990)	I_c
Solos orgânico argilosos	2	$I_c > 3,22$
Argilas	3	$2,82 < I_c < 3,22$
Misturas Siltosas	4	$2,54 < I_c < 2,82$
Misturas arenosas	5	$1,90 < I_c < 2,54$
Areias	6	$1,25 < I_c < 1,90$
Areias grosseiras	7	$I_c < 1,25$

Os ensaios CPTu foram realizados de acordo com os procedimentos normativos propostos no *Report of the ISSMFE Technical Committee on Penetration Test of soils – TC 16 e ASTM D5778*.

3.4.1. Parametrização baseada nos ensaios CPTu

No caso dos solos granulares, os valores da resistência de ponta (q_c) são normalmente utilizados na previsão do valor da compactidade relativa (D_r) e/ou do ângulo de resistência ao corte (ϕ').

Apesar de actualmente serem reconhecidas as limitações da utilização deste parâmetro (D_r) na previsão do comportamento mecânico dos materiais granulares, já que, para além das condições de compactidade este é fortemente condicionado pelo estado de tensão a que os materiais estão sujeitos, continua ainda a ser prática corrente a sua utilização, pelo menos como indicador das características mecânicas evidenciadas por estes materiais.

Os materiais intersectados corresponderem a solos eminentemente granulares. Contudo deverão surgir por vezes camadas de composição silto-argilosa relevantes. De modo a estimar o estado de compactidade dos materiais com componente granular, interceptados pelos ensaios CPTu, serão utilizadas correlações empíricas consagradas na bibliografia.

Jamiolkowski *et al.*, (1985), mostra que as correlações estabelecidas entre a resistência de ponta e as tensões efectivas a uma dada compactidade relativa são idênticas na sua forma, mas são fortemente influenciadas pela compressibilidade das areias (figura 16).

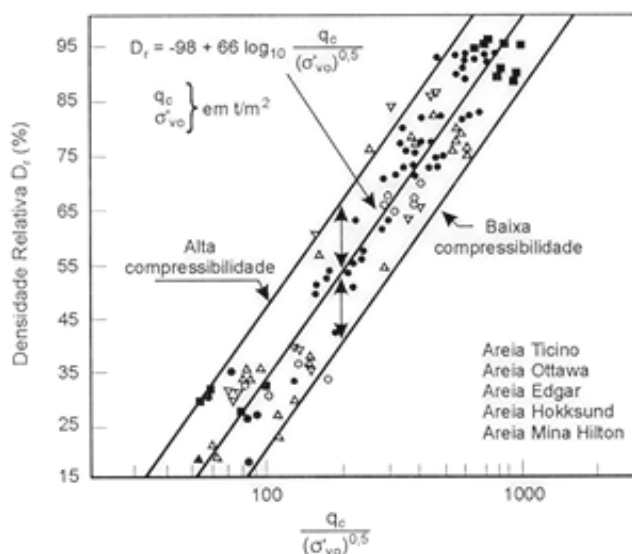


Figura 16 - Previsão de D_r através de q_c (Jamiolkowski *et al.*, 1985).

Schnaid e Houlsby (1992) referem que a correlação apresentada na figura anterior fornece uma estimativa de D_r com uma precisão de $\pm 20 \%$, sendo aceitável para solos normalmente consolidados.

Foi ainda utilizada a proposta de Kulhawy e Mayne (1990) para estimar a compacidade relativa dos materiais granulares:

$$D_r^2 = \frac{q_{c1}}{305 Q_c \times Q_{OCR} \times Q_A} \quad (17)$$

em que:

$$q_{c1} = \text{resistência de ponta normalizada: } q_{c1} = \frac{\frac{q_c}{Pa}}{\left(\frac{\sigma'_V}{Pa}\right)^{0,5}}$$

p_a = pressão atmosférica nas mesmas unidades de q_c

Q_c = factor dependente da compressibilidade do material

$$0,91 < Q_c < 1,09$$

Q_{OCR} = factor dependente do grau de “sobreconsolidação”

$$Q_{OCR} = OCR^{0,18}$$

Q_A = factor dependente da idade do depósito

$$Q_A = 1,2 + 0,05 \log (t/100)$$

3.4.2. Características de resistência ao corte dos materiais granulares

A resistência ao corte dos solos granulares não cimentados é geralmente expressa em termos do ângulo de resistência ao corte de pico (ϕ'). Vários métodos têm sido propostos para a utilização do parâmetro q_c (resistência de ponta) com vista à previsão de ϕ' . No entanto, mesmo nos solos puramente granulares não existe uma relação única entre a resistência à penetração estática (q_c) e o ângulo de resistência ao corte (ϕ'), já que q_c depende tanto da resistência ao corte como da deformabilidade. Deste modo, os resultados previstos para o parâmetro ϕ' devem ser sempre analisados com espírito crítico e consignados à realidade do terreno penetrado.

À semelhança do que acontece na previsão de D_r , são utilizadas correlações, estabelecidas para materiais de composição granular, para prever ϕ' . Assim será utilizada a proposta de Robertson e Campanella (1983), concebida para prever valores de ϕ' de areias não cimentadas, predominantemente silicatadas, moderadamente compressíveis (figura 17).

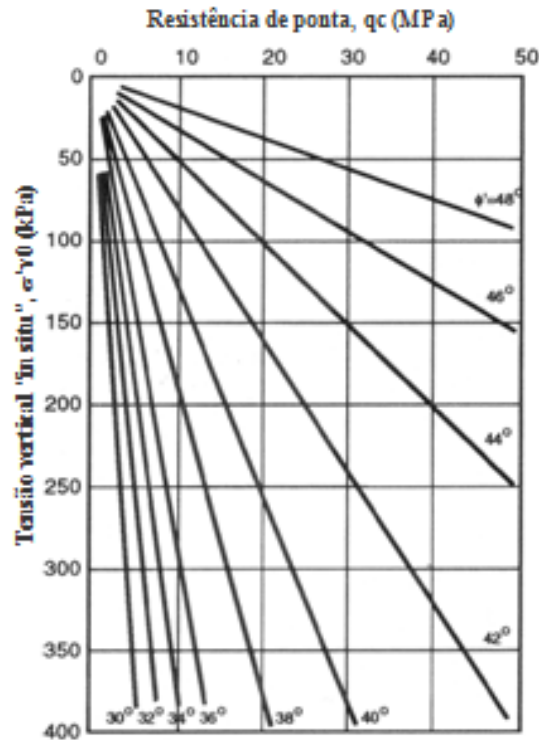


Figura 17 - Relações entre σ'_{v0} , q_c e ϕ' (Robertson e Campanella, 1983).

Para além da proposta de Robertson e Campanella (1983), utiliza-se a proposta de Clausen e Denver (1995) para estimar o parâmetro ϕ' , pela correspondente formulação

$$\phi_{NC} = 17,2^\circ \left(\frac{q_c}{\sigma'_{v0}} \right)^{0,185} \quad (18)$$

Será ainda experimentada, na avaliação do o parâmetro ϕ' a proposta de Kulhawy e Mayne (1990):

$$\phi' = 17,6^\circ + 11,0^\circ \log(q_{c1}) \quad (19)$$

3.4.3. Características de resistência ao corte dos materiais coesivos

Uma das mais antigas aplicações do ensaio CPT diz respeito à avaliação da resistência ao corte não drenada (c_u) dos solos finos (argilas). As soluções analíticas do problema geralmente resultam da análise da equação:

$$q_t = N_c \cdot c_u + \sigma_{v0} \quad (20)$$

em que N_c corresponde a um factor que depende do cone e σ_{v0} diz respeito à tensão total *in situ*. No caso da penetração não drenada, o factor do cone N_c é função do índice de rigidez (G/c_u) que traduz a dependência do efeito da rigidez do solo bem como da resistência à penetração. Contudo, os solos reais comportam-se de forma diferente das idealizações constantes nos modelos teóricos, pelo que normalmente é necessário recorrer a correlações empíricas para obter uma relação entre c_u e q_t .

No caso da resistência não drenada a relação mais comum é:

$$q_t = N_{kt} \cdot c_u + \sigma_{v0} \quad (21)$$

em que N_{kt} é um factor empírico que depende do cone, sendo comum na bibliografia balizá-lo entre 0 e 20, consoante as características de plasticidade dos materiais. Na prática são geralmente adoptados valores de N_{kt} que se situam entre 12 e 16. Contudo no caso de solos sensíveis este valor deve ser reduzido para 10 ou mesmo menos, dependendo do grau de sensibilidade. Tendo em consideração resultados recentes de ensaios FVT realizados perto do local em investigação (Bonito, 2009 – “Reologia dos lodos e de outros sedimentos recentes da ria de Aveiro”), assumiu-se o valor de $N_{kt}=16,5$ resultante desses ensaios e estimou-se o valor de c_u .

3.4.4. Módulo de distorção inicial (G_0)

O módulo de distorção para pequenas deformações (G_0) é um parâmetro fundamental para o cálculo da resposta dos terrenos a solicitações sísmicas e dimensionamento de fundações sujeitas a acções dinâmicas. Para além disso, a não linearidade da rigidez com a deformação é reconhecidamente uma importante característica dos materiais terrosos, pelo que o conhecimento do valor de G_0 é de extrema importância pois constitui um valor de referência que permite o enquadramento de outros módulos de deformabilidade, quando definidos para diferentes valores de deformação. O módulo de distorção para pequenas deformações (G_0) é definido a partir da teoria da elasticidade por:

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (22)$$

3.4.5. Módulo de deformabilidade (E')

A avaliação do módulo de deformabilidade através de ensaios CPTu em solos de matriz granular é feita sempre com grandes reservas, dada a dependência da história de tensões e deformações, estado e trajetória das tensões e grau de deformação. De qualquer dos modos, inúmeras correlações são apresentadas na bibliografia entre o módulo de deformabilidade (E) e a resistência à penetração (q_c), as quais têm sido estabelecidas na tentativa de contornar os obstáculos que se colocam na avaliação das características de deformabilidade dos solos granulares em laboratório, dada a dificuldade na colheita de amostras indeformadas.

Intensa pesquisa tem sido efectuada em câmaras de calibração no sentido de avaliar as características de deformabilidade pelo ensaio CPT. Baldi *et al.* (1989) apresentam uma carta de avaliação do módulo de deformabilidade secante (E'_s) correspondente a um nível de deformação axial de 0.1 %, que permite o enquadramento da história das tensões (figura 18).

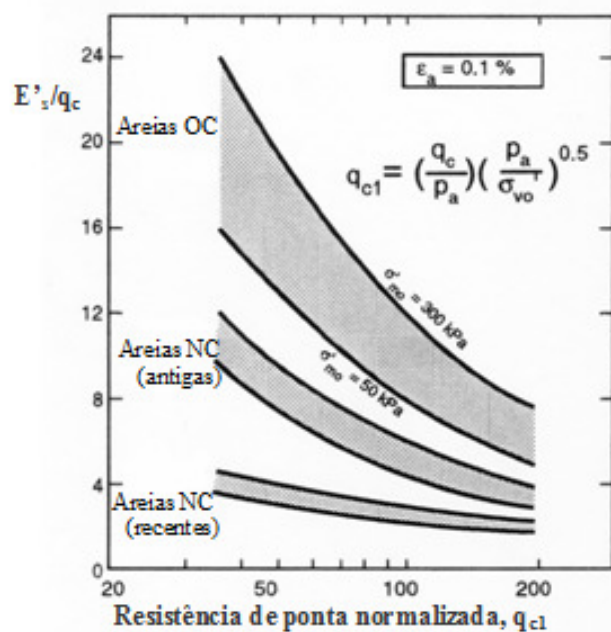


Figura 18 - Avaliação do módulo de deformabilidade drenado secante a partir do CPT para areias siliciosas (Baldi *et al.*, 1989).

3.4.6. Módulo de compressão unidimensional (M)

A maioria das correlações para avaliação do módulo de compressão unidimensional refere-se ao

módulo tangente, como o determinado nos ensaios edométricos, em que um incremento de tensão $\Delta\sigma'_v$ resulta numa variação do volume relativo $\Delta V/V$.

$$M = \frac{1}{m_v}; \quad m_v = \text{módulo de compressibilidade volumétrico} \quad (23)$$

A maioria das formulações que relacionam este parâmetro com os resultados dos ensaios CPT toma geralmente a forma:

$$M = \alpha \cdot q_c$$

No caso dos materiais granulares α assume normalmente os seguintes valores:

$$\begin{aligned} 1,5 < \alpha < 4 & \quad \text{para as areias normalmente consolidadas} \\ 8 < \alpha < 15 & \quad \text{para as areias sobreconsolidadas} \end{aligned}$$

A admissão de um valor para α deve contudo ser efectuado com algumas cautelas, já que α depende de vários parâmetros, designadamente: OCR, σ'_{v0} e $D_r\%$, entre outros. Vésic (1970) propôs por exemplo a seguinte expressão para estimar α .

$$\alpha = 2 + 2D_r^2 \quad (24)$$

Com base nas formulações anteriores procedeu-se à avaliação do parâmetro M para os solos com parcela granulométrica granular interceptados nos três ensaios SCPTu.

No caso da avaliação dos parâmetros de deformabilidade em condições drenadas, a partir dos valores de q_t resultantes dos resultados dos ensaios CPTu obtidos em condições não drenadas, podem conduzir-nos a previsões imbuídas de erros grosseiros. Apesar disso existem na literatura diversas propostas de correlação como anteriormente da forma:

$$M = \alpha \cdot q_c$$

Na bibliografia surgem as seguintes propostas para avaliação de α (tabela 5).

Tabela 5 – Avaliação α para cálculo do Módulo de deformabilidade

$M = \alpha q_t$		
Argila de baixa plasticidade (CL)	$3 < \alpha < 8$	$q_t < 7 \text{ bar}$
	$2 < \alpha < 5$	$7 < q_t < 20 \text{ bar}$
	$1 < \alpha < 2,5$	$q_t > 20 \text{ bar}$
Siltes de baixa plasticidade (ML)	$3 < \alpha < 6$	$q_t > 20 \text{ bar}$
	$1 < \alpha < 3$	$q_t < 20 \text{ bar}$
Siltes e argilas de elevada plasticidade (MH, CH)	$2 < \alpha < 6$	$q_t < 20 \text{ bar}$
Siltes orgânicos (OL)	$2 < \alpha < 8$	$q_t < 12 \text{ bar}$
Turfas e argilas orgânicas (P _t , OH)	$1,5 < \alpha < 4$	$q_t < 7 \text{ bar}$
	$1 < \alpha < 1,5$	$50 < W < 100$
	$0,4 < \alpha < 1$	$100 < W < 200$ $W > 200$

Kulhawy e Mayne (1990) propõem a seguinte expressão para avaliação do parâmetro M, a qual apenas poderá ser aplicado aos mais recentes piezocones.

$$M = 8.5(q_t - \sigma'_{v0}) \quad (25)$$

4. AREA DE ESTUDO

4. ÁREA DE ESTUDO

4.1. INTRODUÇÃO

Como já foi referido introdutoriamente, este estudo foi realizado com o intuito de aferir a metodologia de execução do ensaio sísmico do piezocone, com o ajuste à distância da fonte sísmica ao referido ponto de ensaio, assim como a sua dimensão mais apropriada para a aquisição do melhor resultado, em termo de leituras.

A norma relativamente a ensaios sísmicos (ASTM 5778) não define relativamente a certos parâmetros a serem introduzidos, por exemplo, dimensões e afastamentos da fonte sísmica.

A dúvida reside a partir de que ponto é possível identificar a velocidade da onda de corte para que o cálculo dos parâmetros em que a mesma seja directamente ligada, como o Módulo distorcional G_0 , seja o mais correcto possível. Hoje em dia estes ensaios são mais do que essenciais e obrigatórios para uma correcta interpretação de problemas que existem devido à ocorrência sísmica a nível mundial.

Foram realizados vários ensaios, no denominado campus experimental de Aveiro, situado na periferia da Universidade de Aveiro, junto ao campo de treino. Para tal foram realizados 3 tipos de ensaios com o piezocone sísmico. Um deles para verificar uma nova metodologia de ensaio, que ao invés de executar o ensaio sísmico aquando da mudança de vara, que implica dissipação na poro-pressão, propõe-se a aquisição das velocidades de corte em modo ascendente, após termino do ensaio CPT.

Como se irá verificar no ponto 5, após o término do ensaio CPT, é possível, de acordo com a metodologia de identificação apresentada por Saraiva Cruz, 2008, executar ensaios sísmicos intermédios em locais de maiores dúvidas ou incertezas.

Foi executado um ensaio para verificar a influência na dimensão da fonte, onde foram testadas 3 fontes de madeira de dimensões de 1m, 1,5m e de 2m, com um afastamento fixo de 2m ao ponto de cravação da vara do piezocone sísmico.

Por último foi realizado o ensaio em que se testou a variação de 4 distâncias das fontes sísmicas de duas dimensões distintas ao ponto de cravação.

4.2. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

O conhecimento geológico prévio da área em estudo revela-nos que os solos expostos à superfície correspondem a materiais silto-argilosos de cor escura e essencialmente lodosos, os quais são precedidos por materiais Cretácicos de elevada rigidez. Na figura 19 apresenta-se a localização aproximada do local em investigação.

Geologicamente os terrenos em interesse neste estudo enquadram-se na Bacia sedimentar de Aveiro, caracterizada na folha 16-A, Aveiro, da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50000. Assim a maior parte dos materiais atravessados correspondem essencialmente a siltes a siltes-arenosos, progressivamente lodosos, sendo por vezes micáceos, de tons acinzentados a negros, estando nas camadas superiores lodos por vezes arenosos, de cor negra. Nestas zonas, ocorrem por vezes a topo areias finas, de proveniência eólica, de tons geralmente acastanhados claros a esbranquiçados. Sendo que na base, é possível por vezes encontrar matérias correspondentes a níveis de praias antigas e terraços fluviais, que repousam sobre materiais do Cretácico – Argilas de Aveiro.

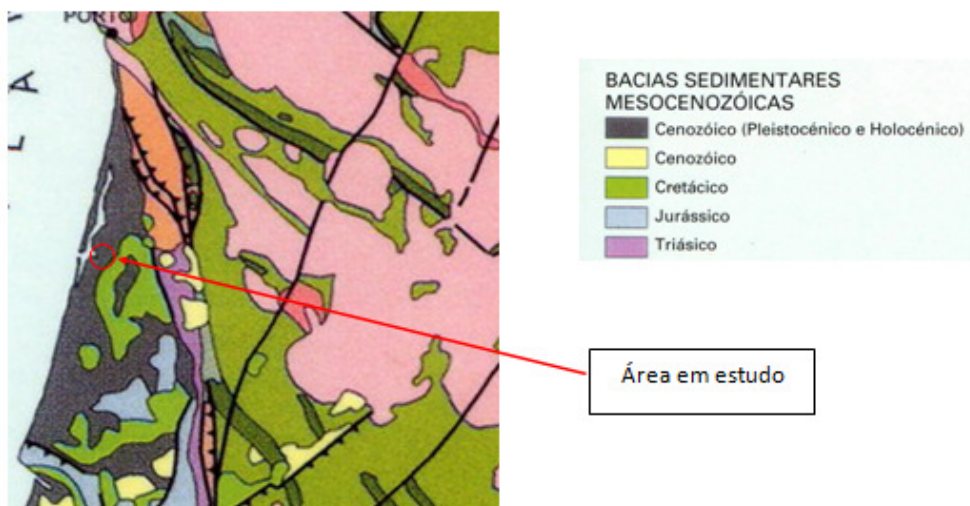


Figura 19 – Geologia do local em estudo (Carlos Rodrigues, 2010)

4.3. EQUIPAMENTO DE ENSAIO

Na realização dos ensaios, foi usado um equipamento de cravação, cedido pela empresa Mota-Engil, que diz respeito ao modelo B47 da Mobile Drill, montado num camião com rodados de pneus, com tracção 4x4 e 19 ton de peso. Isto permitiu-nos uma certa autonomia dado que o

equipamento pôde movimentar-se em qualquer via, não estando limitado ao tradicional transporte dos equipamentos em camiões de carga com zorra. Para além disso o seu peso próprio é suficiente para garantir a reacção necessária à execução dos ensaios de penetração estática.

O cone holandês é um modelo da PAGANI, gentilmente cedido pelo Instituto Politécnico da Guarda, com capacidade de resistência de ponta de 50 MPa, 0,5 MPa de atrito lateral e 2,5 MPa de poro-pressão, estando este último elemento situado na posição u_2 , ou seja localizado imediatamente atrás da ponteira (ver figura 20). O factor de área, fornecido pelo fabricante, é de $a=0,58$.

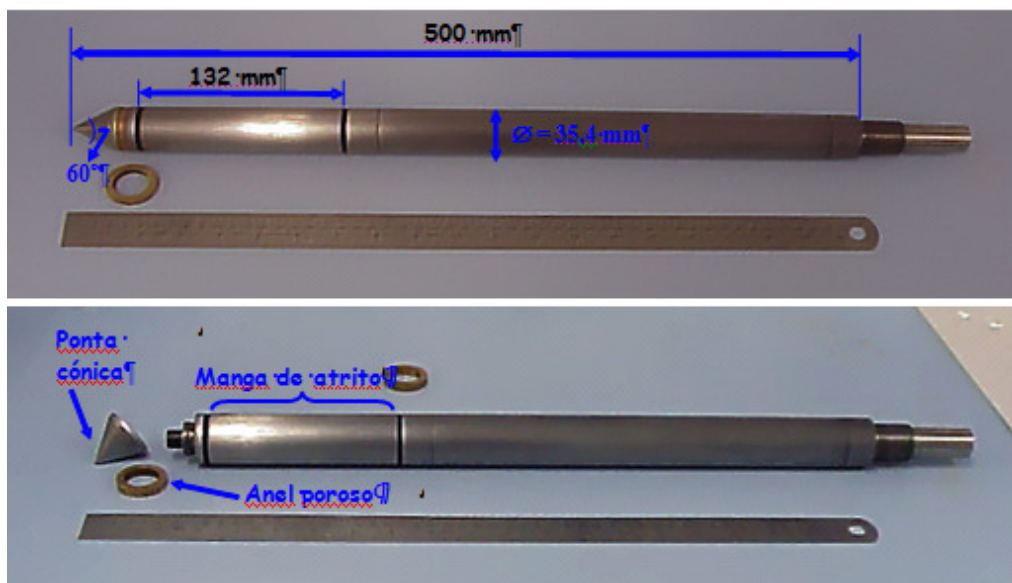


Figura 20- Características do piezocone da Pagani (Carlos Rodrigues, 2010)

A ponteira tem um ângulo de ataque de 60° e 10cm^2 de área, com uma área para medição de atrito lateral de 150cm^2 .

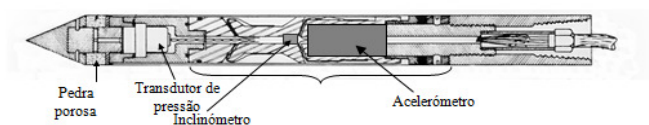


Figura 21 – Esquema do piezocone utilizado (Carlos Rodrigues, 2010)

Os acelerómetros estão dispostos triaxialmente, conforme já foi identificado no 3.2. As fontes de emissão de energia, foram barrotes de madeira de secção rectangular e comprimento de 1,0m, 1,5m e 2,0m, com placas metálicas colocadas nos extremos (figura 22).



Figura 22 – Fontes de emissão de energia usadas.

Com estas fontes, geram-se à superfície as ondas de corte, polarizadas horizontalmente, por acção de um martelo, correctamente ligado ao sistema, de modo a dar início ao registo, aquando do impacto na fonte.

De seguida mostra-se a localização e esquema dos ensaios realizados (figura 23), implementados sobre uma imagem do GoogleEarth.

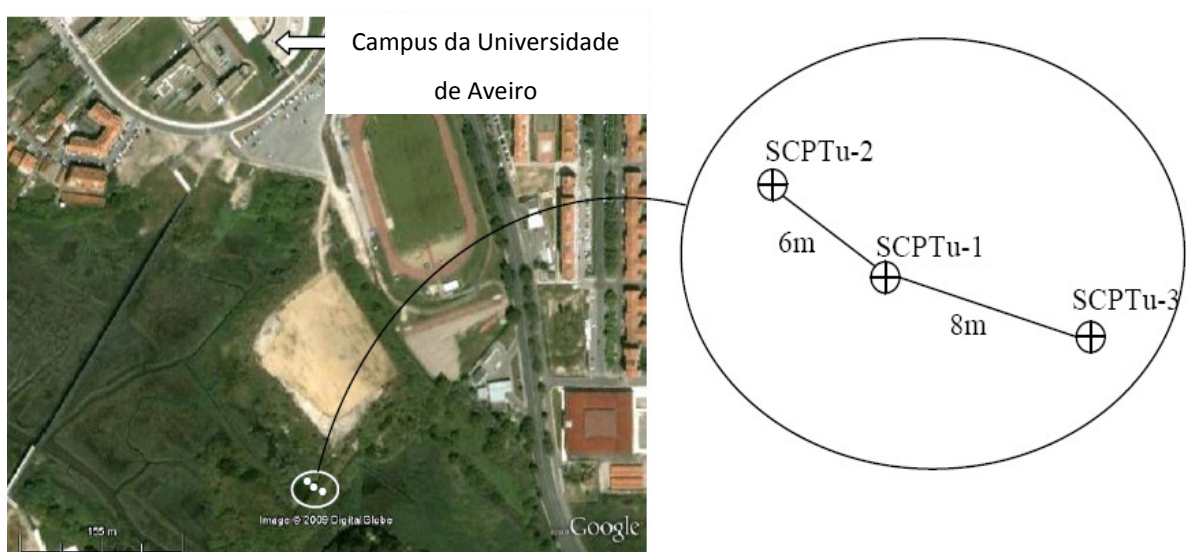


Figura 23 - Vista GoogleEarth com localização esquemática dos 3 ensaios realizados (Rodrigues et al, 2010)

Uma vez que o local de estudo escolhido, situava-se encostado de uma ribeira, isso implicou que o nível freático, medido durante toda a campanha, se situasse junto à superfície, portanto optou-se pela aquisição unicamente das ondas de corte.

As fontes de energia, de impacto, conforme já foi mencionado (figura 22), foram fontes de madeira, com placas metálicas a topo, separadas da unidade de cravação para eliminar a influência de vibrações de qualquer tipo nos registos, provenientes desse equipamento.

Com este esquema de montagem do equipamento, foi-nos possível gerar ondas de corte polarizadas horizontalmente, com ajuda de impacto de um martelo sísmico de 5kg de massa, dando o impacto nas extremidades metálicas das fontes.

Para a interpretação das velocidades de propagação das ondas de corte, foram utilizados dois métodos, o método da Correlação Cruzada (“Cross-Correlation Technique”) e o método da Polaridade Inversa (“Reverse Polarity Technique”).

A execução do ensaio CPTu, permite a obtenção directa de alguns parâmetros importantes na caracterização dos maciços em estudo, tal como a resistência de ponta (q_c), o atrito lateral (f_s) e a pressão da água nos poros desenvolvida durante a cravação (u_2).

5. AVALIAÇÃO DAS ONDAS S EM FASE ASCENDENTE

5. AVALIAÇÃO DAS ONDAS S EM FASE ASCENDENTE

5.1. PROCEDIMENTO DE EXECUÇÃO NO ENSAIO SCPTu-1

Na execução do ensaio SCPTu-1, optamos por proceder à cravação da ponteira cônica, sem interrupções, para análise dos dados obtidos do ensaio CPTu e assim conhecer as características do terreno atravessado.

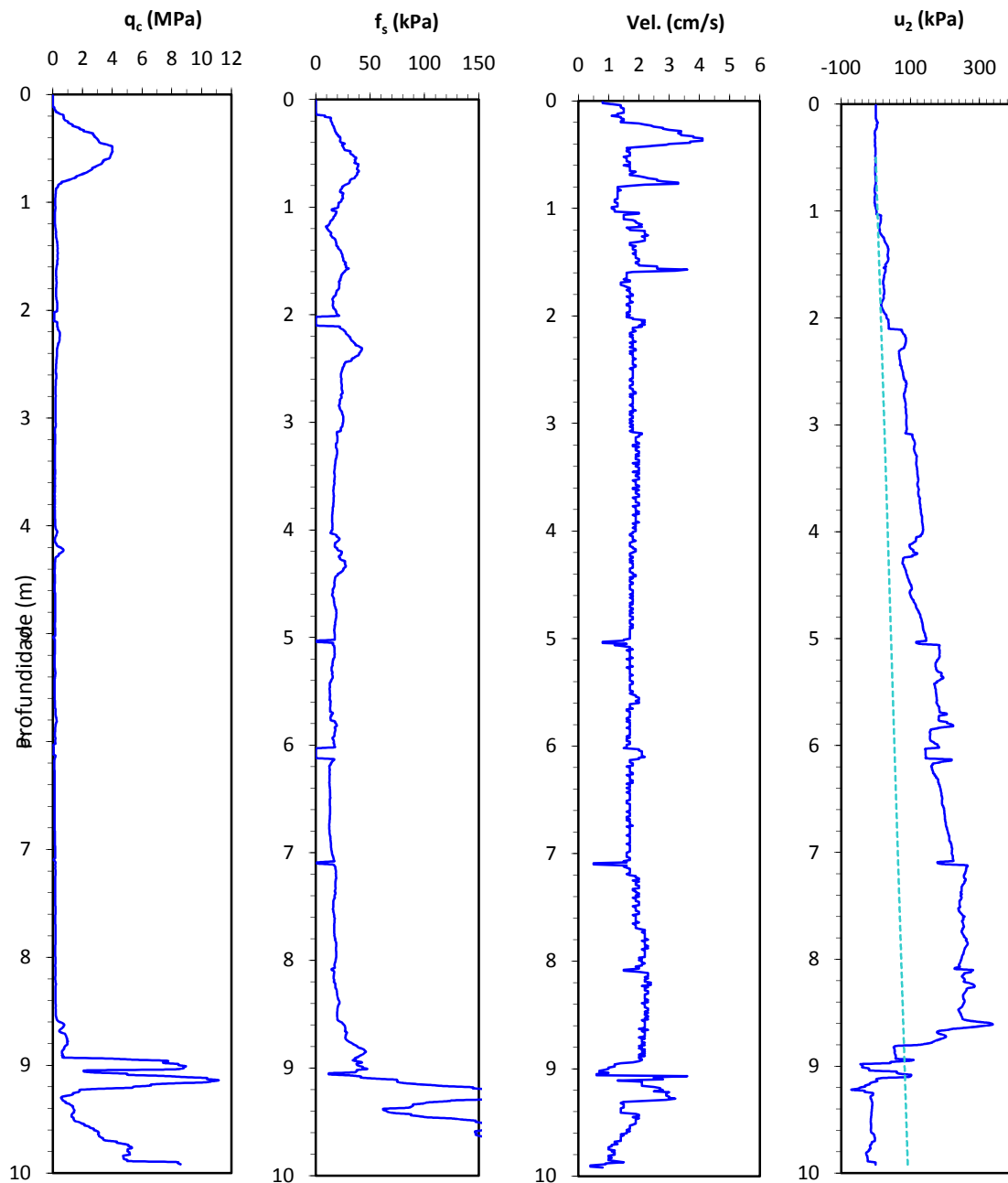


Figura 24 - Valores obtidos no ensaio CPTu-1

Segundo proposto por Saraiva Cruz (2008), a conjugação de parâmetros obtidos directamente aquando da execução do ensaio CPT, oferece-nos um prévio conhecimento das condições locais do maciço em estudo, ao que foi denominado pelo autor de ***método de classificação visual*** (Saraiva Cruz, 2008).

Com a aplicação desta metodologia, o técnico de ensaio, poderá prever o tipo de litologias e também estimar o estado de compacidade/sobreconsolidação a que se encontra o local de estudo.

Deste modo é possível distinguir os solos arenosos, aqueles em que a resistência de ponta apresenta valores elevados, geralmente superiores a 5MPa. Para além disto a razão de atrito lateral baixa é normalmente baixa, com valores aproximados a 1% (entre 0,5% e 1,5%). Os dados medidos da poro-pressão próximos da pressão hidrostática, ou seja $U_2 \cong U_0$, se este for negativo, isso normalmente implica que as formações correspondem a solos sobreconsolidadas ou a solos cimentados.

Os solos argilosos são distinguidos por apresentar resistência de ponta baixa, valores normalmente inferiores a 5MPa (autores que defendem que este valor tem como patamar máximo os 2MPa), as razões de atrito altas, com valores superiores a 3% e os registos da poro-pressão são geralmente superiores à pressão hidrostática.

Segundo este método então, em campo ao ser analisado a figura 24, teríamos a seguinte interpretação (figura 25):

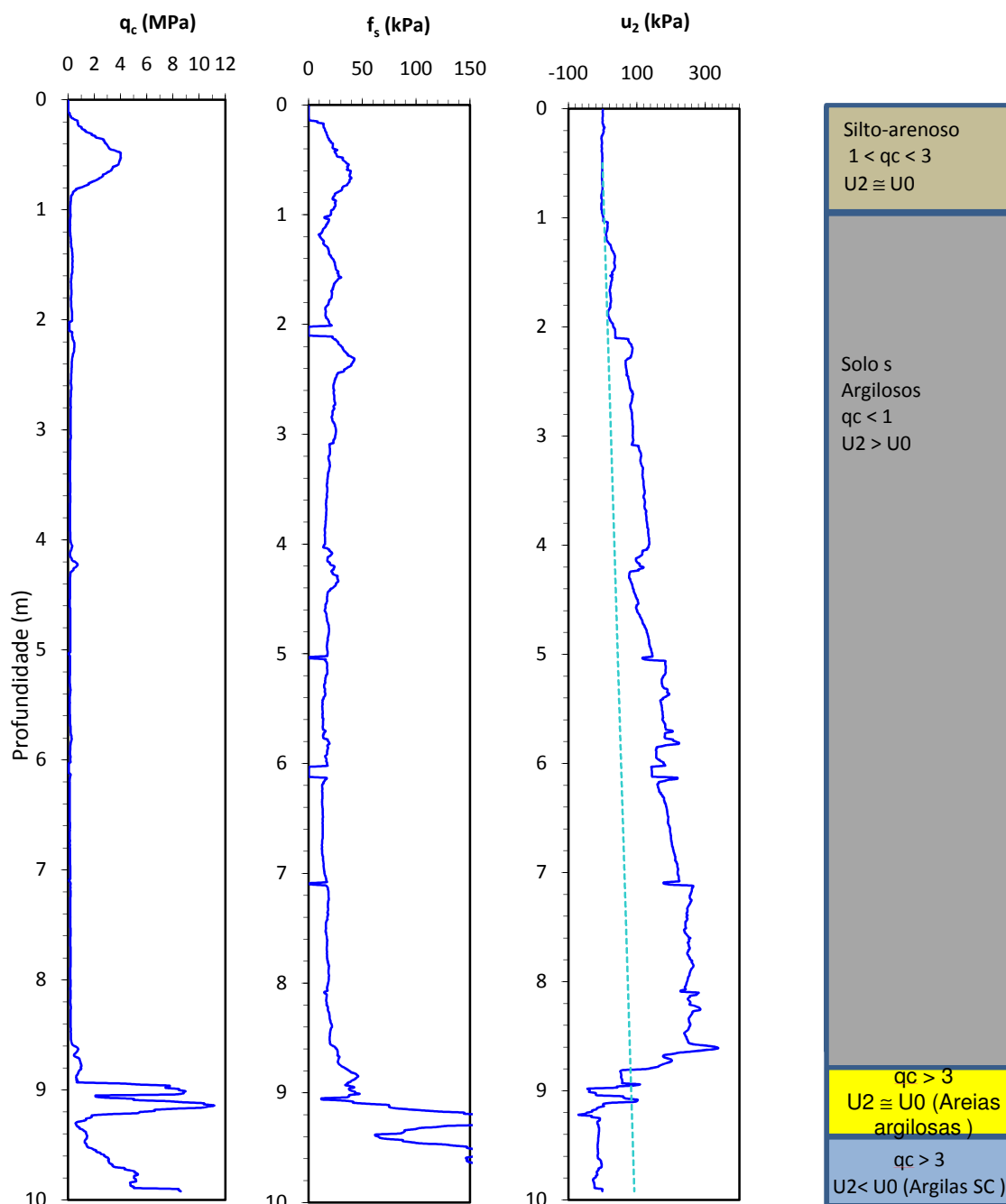


Figura 25 - Interpretação dos registos do Cptu-1

Neste caso concreto, não existe dúvida na elaboração do traçado do perfil. Ele corresponde a uma pequena cobertura arenosa, com espessura inferior a 1m, precedida de uma unidade argilosa. Na base do registo, pode ser observada uma camada arenosa, com resistências altas e por fim uma camada de argilas sobreconsolidadas. Assim adoptou-se como metodologia de avaliação da velocidade de propagação das ondas S que o registo sísmico fosse efectuado de metro a metro, na fase ascendente de retirada do trem de varas. No caso em que existe dúvida sobre algum

ponto ao longo do perfil, ou um interesse particular numa determinada posição, poder-se-ia parar o sistema e nesse ponto efectuar a aquisição dos sinais sísmicos, em posições diferentes das normalmente efectuadas que dizem respeito às paragens de metro a metro.

Após a rápida análise sobre se seria ou não necessária alguma paragem intermédia, passou-se então à aquisição do registo das velocidades das ondas de corte, na fase ascendente, com aquisição de ondas sísmicas metro a metro.

Utilizou-se uma fonte sísmica de 2,0m de comprimento, com placas metálicas a topo e um afastamento de 2,0m ao ponto de cravação (figura 26). A massa utilizada para o impacto na fonte sísmica foi de 5kg.

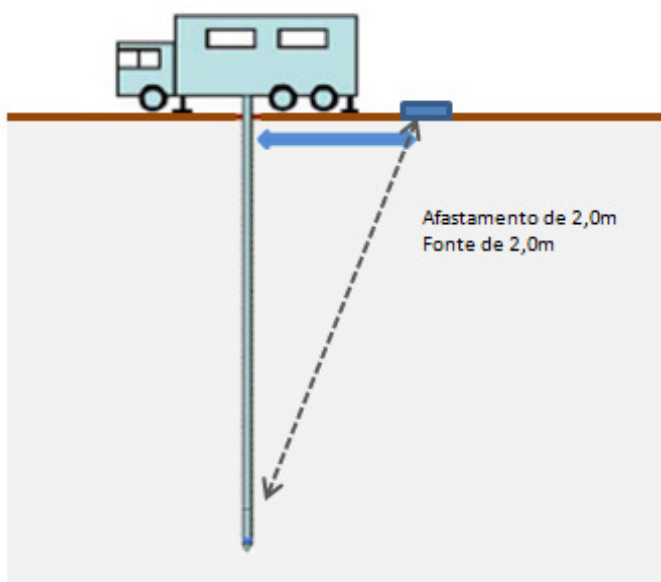


Figura 26 – Esquema de aquisição de dados sísmicos no ensaio SCPTu-1 (adaptado de Mayne, 2007)

O ensaio foi realizado segundo o método ascendente e os dados foram registados em sistema informático próprio do equipamento para posterior análise dos registos das velocidades adquiridas.

As medições foram efectuadas com recurso ao software SC1-DAC/1.5® “Seismic Cone Data Acquisition” e o tratamento da informação foi realizado com recurso ao software SC1-RAV/2.0®- “Seismic Cone Data Reduction, Analysis, and Display”, (U.S. Patent #5,177,709; Canadian Patent #2,077,387).

Na análise das velocidades registadas foram usados dois métodos de interpretação de ondas sísmicas, o *método da Correlação Cruzada* (Cross-Correlation technique) e o *método da Polaridade Inversa* (Reverse Polarity technique).

5.1.1. Interpretação de ondas sísmicas pelo Método da Correlação Cruzada (“Cross-Correlation technique”)

O método da correlação cruzada, consiste num algoritmo matemático, patenteado nos Estados Unidos e no Canada, usado para estimar o intervalo das velocidades das ondas provenientes do piezocone sísmico.

Esta técnica calcula o intervalo das velocidades do piezocone sísmico, baseado numa correlação cruzada entre as ondas obtidas entre duas profundidades consecutivas (Baziw 1993). O valor de chegada máximo é assumido como sendo o tempo em que a onda demora a percorrer as duas profundidades.

Em comparação com a técnica da polaridade inversa, traz vantagens relativamente ao erro derivado da intervenção visual do utilizador, no processo de aquisição da velocidade, ao seleccionar o ponto onde se cruzam as ondas de maior amplitude.

Tem também a vantagem de correlacionar o sinal completo da onda sísmica, ao invés de um só ponto. Desta técnica deriva um coeficiente de correlação entre as ondas de chegada, que pode ser usado como factor de fiabilidade sobre a exactidão da velocidade estimada.

Como obtém duas velocidades independentes através da análise dos sinais das ondas polarizadas, através do coeficiente de correlação, pode ser escolhido aquele em que gera um valor de coeficiente mais elevado, ou seja, de maior fiabilidade.

5.1.2. Interpretação de ondas sísmicas pelo Método da Polaridade Inversa (Reverse Polarity technique)

Este método recorre a dois registos sísmicos de polaridade invertida, gerados à superfície, e registados a uma mesma profundidade, que são confrontados com outros dois registos sísmicos, correspondentes a uma profundidade subsequente. Após filtragem dos sinais (caso seja necessário), marcam-se os pontos correspondentes ao cruzamento do sinal sísmico devido à

inversão da polaridade, normalmente no ponto anterior ao sinal de maior amplitude. Conhecendo a diferença de profundidade do registo dos sinais e o diferencial de tempo dos pontos de referência da inversão do sinal é possível estimar a velocidade de propagação da onda de corte nesse intervalo de profundidade.

Na figura 27 apresenta-se a título de exemplo a avaliação da velocidade de propagação da onda de corte, no ensaio SCPTu-1, entre a profundidade de 5 m e 6 m.

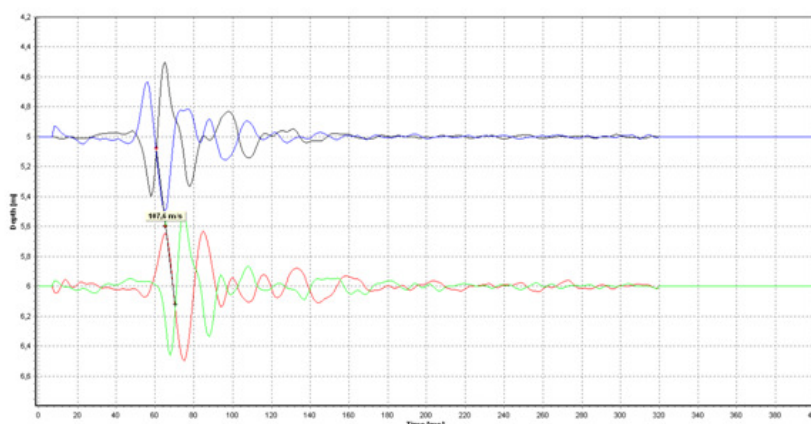


Figura 27 - Exemplo de aplicação do método da Inversão da Polaridade à avaliação da velocidade de propagação da onda de corte no ensaio SCPTu-1, entre as profundidades de 5 e 6 m.

5.1.3. Análise das velocidades das ondas de corte registadas no ensaio

Como já foi referido, a avaliação da propagação das ondas de corte, foi efectuada segundo dois métodos interpretativos, o método da correlação cruzada e o método da polaridade inversa.

A avaliação dessas velocidades foi efectuada de acordo com o factor de correlação maior, gerado pelo método da correlação cruzada, dado que como já foi explicado no ponto anterior, o método da polaridade inversa, não nos fornece este factor. Admitiu-se sempre o valor de correlação gerado superior a 85% ($R^2 > 0,85$) e nos casos em que o valor do factor gerado fosse inferior a 0,85, admitiram-se os valores das velocidades obtidos pelo método da polaridade inversa, desde que esse valor fosse consistente.

Após esta análise, chegaram-se aos valores das velocidades, (tabela 6) para a média espacial das profundidades em que os valores foram registados e comparados com os valores da resistência de ponta obtida no ensaio CPTu-1 (figura 29).

Tabela 6 - Valores das Velocidades de corte SCPTu-1

	Correlação Cruzada				Polaridade Inversa	Velocidade adotada
	Esquerda		Direita			
Profundidade	V_s (m/s)	R^2	V_s (m/s)	R^2	V_s (m/s)	V_s (m/s)
2,5	32,38	0,61	111,02	0,69	108,99	108,99
3,5	86,66	0,67	72,22	0,80	82,10	72,2
4,5	91,3	0,81	91,30	0,80	77,00	91,3
5,5	104,38	0,69	104,38	0,96	64,85	104,4
6,5	95,56	0,69	119,44	0,75	138,81	119,4
7,5	87,83	0,95	74,32	0,86	80,52	87,8
8,5	-	-	-	-	129,00	129,0
9,5	-	-	231,32	0,959	0,00	231,3

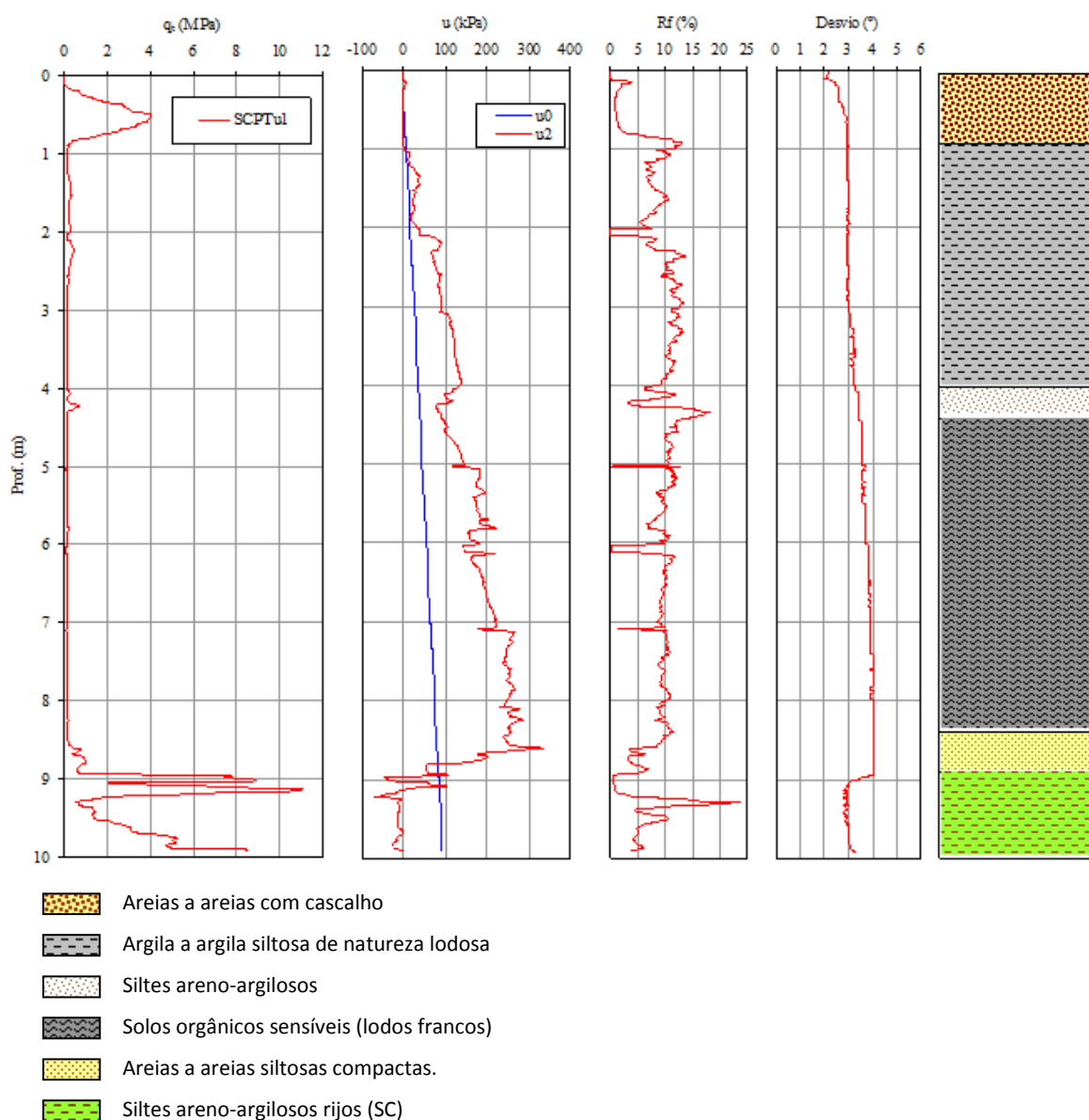


Figura 28 - Valores obtidos após tratamento das velocidades de corte do SCPTu-1

Para além da avaliação da onda de corte, foi efectuado uma avaliação na qualidade do sinal que é registado, nas condições do ensaio.

Efectuou-se uma avaliação na amplitude do sinal chegado, em profundidade. Dessa análise (figura 30) é possível verificar que o sinal em profundidade começa a perder amplitude de onda.

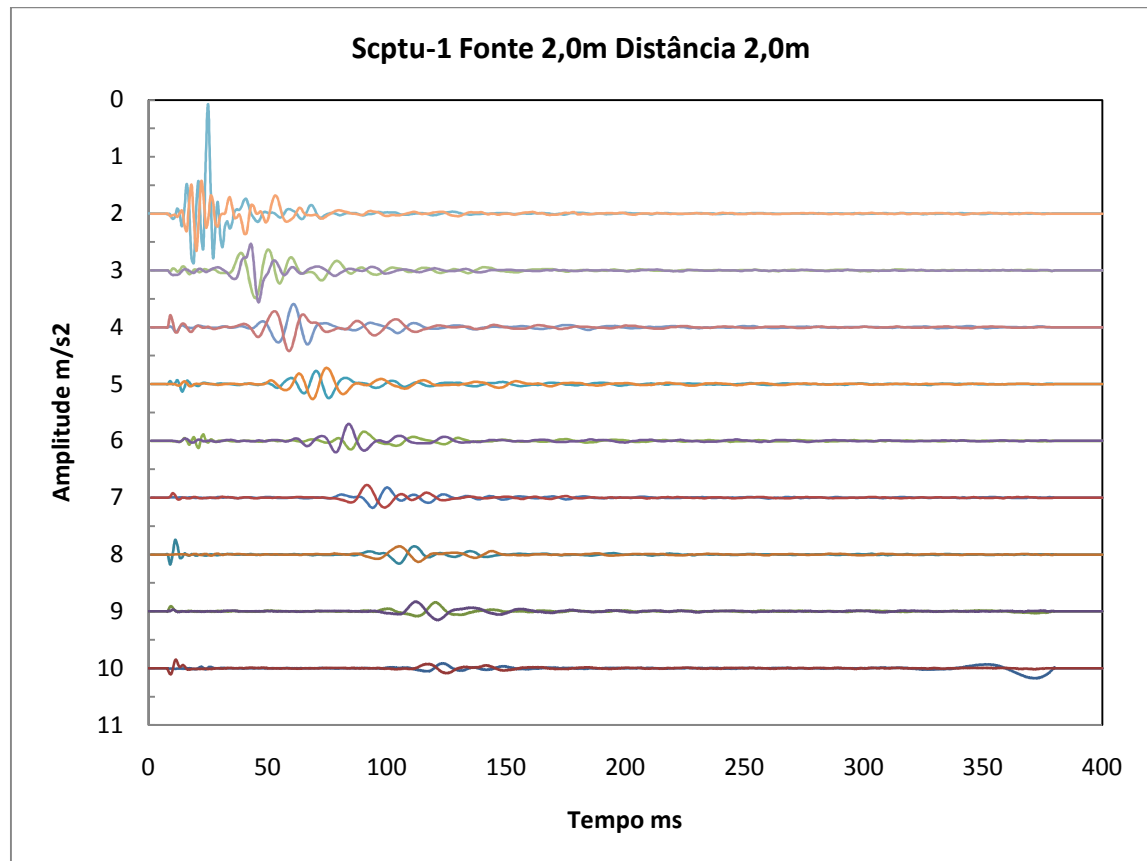


Figura 29 - Amplitude vs tempo de chegada da onda

Da figura é perceptível que em profundidade, existe uma pequena onda que chega em primeiro lugar do que a onda de corte. A razão para a ocorrência deste fenómeno pode ser dada pela chegada de uma onda que se propaga pela vara e chega praticamente ao mesmo tempo.

5.1.4. Caracterização das formações atravessadas

A caracterização do local de estudo, foi efectuada principalmente segundo as projecções conhecidas de Robertson (1990).

Os resultados obtidos (figura 31) mostram um trecho inicial cujos materiais correspondem fundamentalmente a areias por vezes com cascalho que evoluem até aproximadamente 1,0m de profundidade, seguido de uma camada com uma possança aproximada de 3,0m. Logo abaixo uma fina camada de um silte areno-argiloso. A seguir surge um espesso trecho, constituído por materiais de natureza lodosa, até basicamente aos 8,5 m de profundidade. No final surge uma camada com aproximadamente 1,5m de espessura de siltes areno-argilosos rijos.

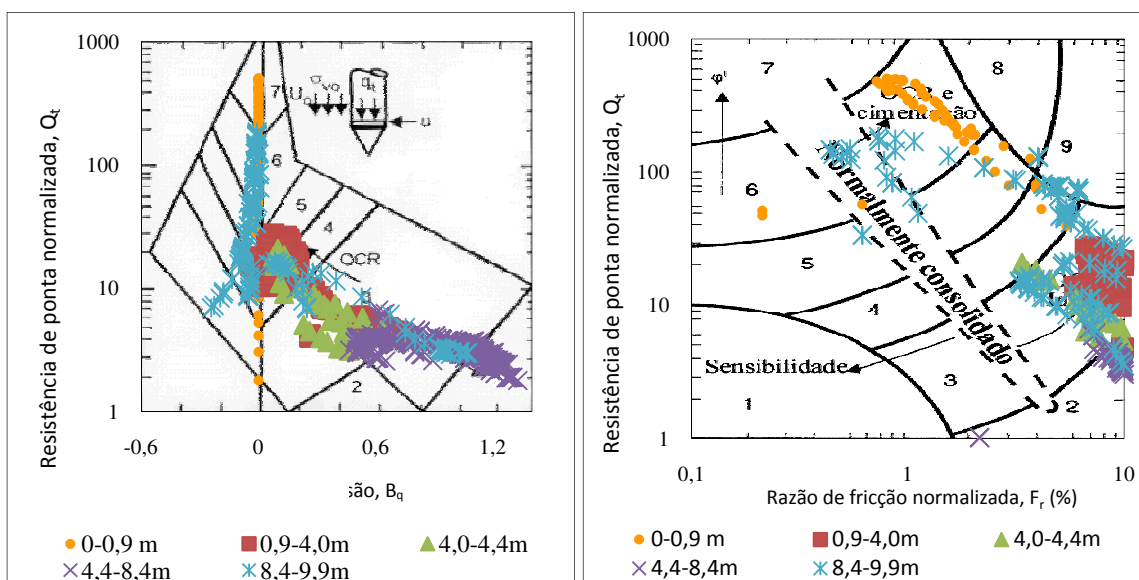


Figura 30 - Projecção dos dados do ensaio CPTu-1 sobre Carta de Robertson, 1990

Na (tabela 7) apresentam-se os valores médios relativos à parametrização geomecânica dos solos intersectados pelo ensaio SCPTu-1.

Tabela 7 – Tabela de parâmetros obtidos no ensaio SCPTu-1

Autor	Parâmetro		Valores obtidos				
			0,0 – 0,9m	0,9-4,0m	4,0-4,4m	4,4-8,4m	8,4-9,9m
Jamiolkowski <i>et al.</i> , (1985)	Dr	%	-	11	11	8	28
de Mello	ϕ'	°	33	-	27	27	31
Clausen Denver	ϕ'	°	44	-	25	22	32
Robertson Campanella	ϕ'	°	42	-	23	17	32
Kulhawy Mayne	ϕ'	°	34	-	24	22	32
Baldi e tal (1989)	E's	MPa	6	2	3	2	11
Vesic (1970)	M	MPa	5	0	1	0	7
Powel e Quaterman (1988)	Cu	KPa	-	19	-	11	-

É de salientar que nesta metodologia, a perícia do executante tem um papel importante no processo, pois quando é executado um ensaio com aquisição de ondas de corte, na fase descendente, a configuração do ensaio permite, através da caixa de controlo da profundidade, executar o ensaio à profundidade correcta. Neste caso, a aquisição em fase ascendente, não se tem acesso a essa informação, dado que o sistema não permite o registo da profundidade na fase de arranque das varas, mas como estas são de comprimento conhecido, assim como o piezocone, é então fácil e rápida a localização a que terá de ser posicionada a ponteira.

As ondas de corte, tem especial importância na determinação do módulo distorcional (G_0 ou G_{max}) que é também conhecido como o módulo distorcional inicial dinâmico (G_{dyn}) (Mayne, 2007), pois juntamente com o peso volúmico é um factor que é introduzido directo na formulação deste parâmetro.

Relativamente ao peso volúmico é possível conhecer o seu valor, ou por intermédio de um outro ensaio in-situ, que seja realizado numa área contígua, ou recorrendo a ensaios de laboratório, executados sobre amostras colhidas no local por meio de amostradores adequados. No caso em consideração foi usado o peso volúmico proveniente da interpretação de ensaios DMT, executados na área em estudo, dado que o ensaio DMT, tem mais rigor na avaliação do peso volúmico.

Na figura 32 apresentam-se os valores para o módulo distorcional conjuntamente com as velocidades de corte e resistência de ponta.

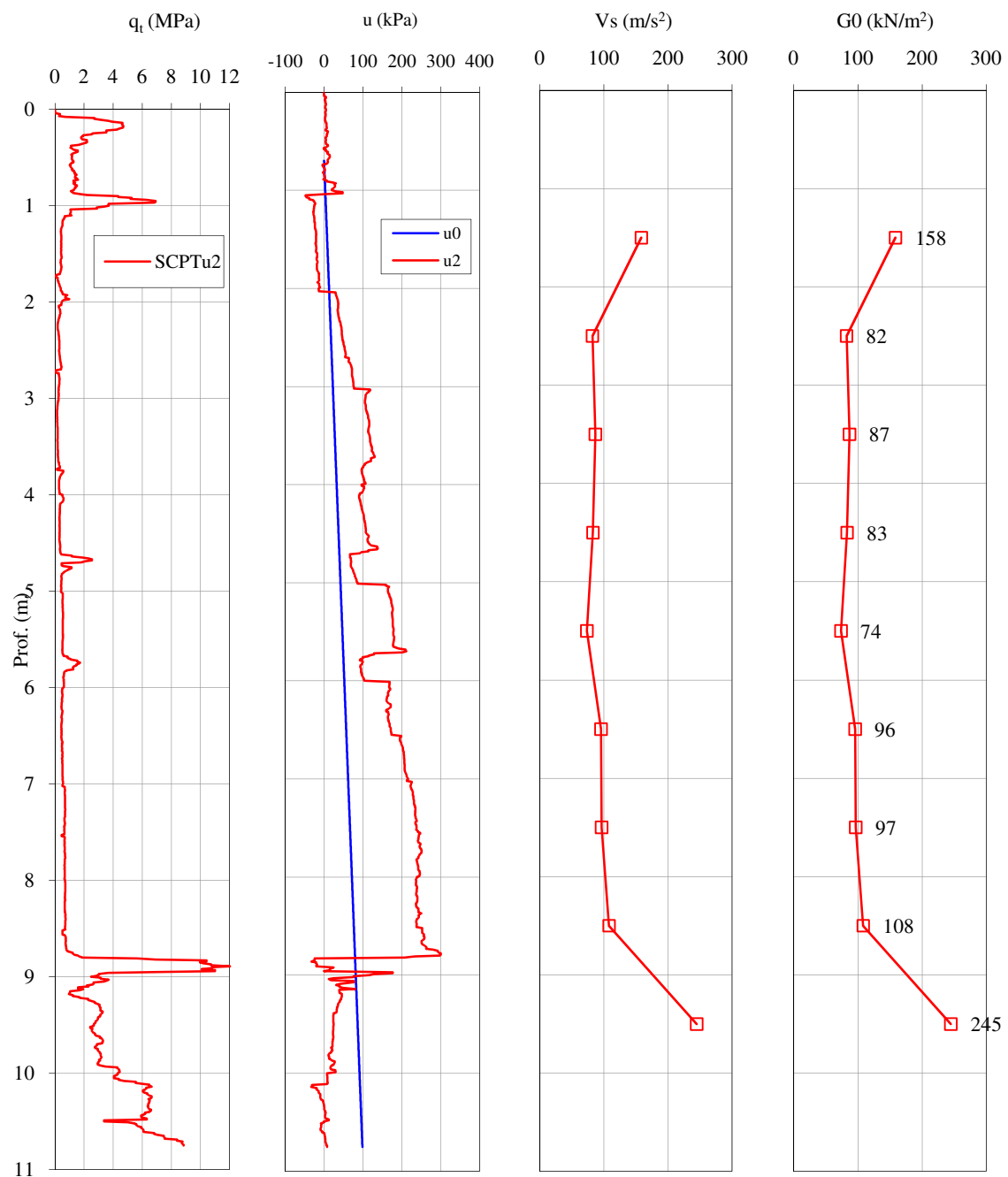


Figura 31 - Apresentação dos valores para G₀ no ensaio SCPTu-1

A execução do ensaio por o método proposto, apresentou-se coerente e com valores aceitáveis e previstos para o local a caracterizar.

Daqui podemos depreender que o método funcionou e foi possível verificar que a metodologia proposta é exequível para o ensaio SCPTu

Segundo o Eurocódigo 8, por serem maioritariamente solos, com valores de velocidades de corte inferiores a 180m/s, estamos perante solos da classe D, classificados como Depósitos de coesão média ou sem coesão (com ou sem algumas camadas pouco coesivas) ou predominantemente solos coesivos moles a rijos.

6. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA DIMENSÃO DA FONTE

6. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA DIMENSÃO DA FONTE

6.1. ENSAIO SCPTu-2

Este ensaio denominado por SCPTu-2, foi realizado pelo método tradicional de aquisições de ondas sísmicas, ou seja em método descendente, mas onde se fizeram variar 3 fontes sísmicas, de características já apresentadas.

Foram realizados os ensaios de aquisição sísmica, metro a metro aquando do processo de acréscimo de mais uma vara ao segmento.

Neste ensaio, fizeram-se variar três fontes sísmicas, uma de 1,0m de comprimento, uma de 1,5m e uma segunda de 2,0m, ambas com o mesmo afastamento ao ponto de cravação, sendo esse de 2,0m.

Neste caso, como o método utilizado foi o descendente, não houve uma pré-visualização das formações atravessadas, mas eram visíveis os dados principais do ensaio, como são normais no ensaio CPTu, no computador de apoio e para além disso eram conhecidas as formações que constituem o perfil, resultado do ensaio SCPTu-1.

No final do ensaio, obtivemos o seguinte registo no ensaio CPTu (figura 33):

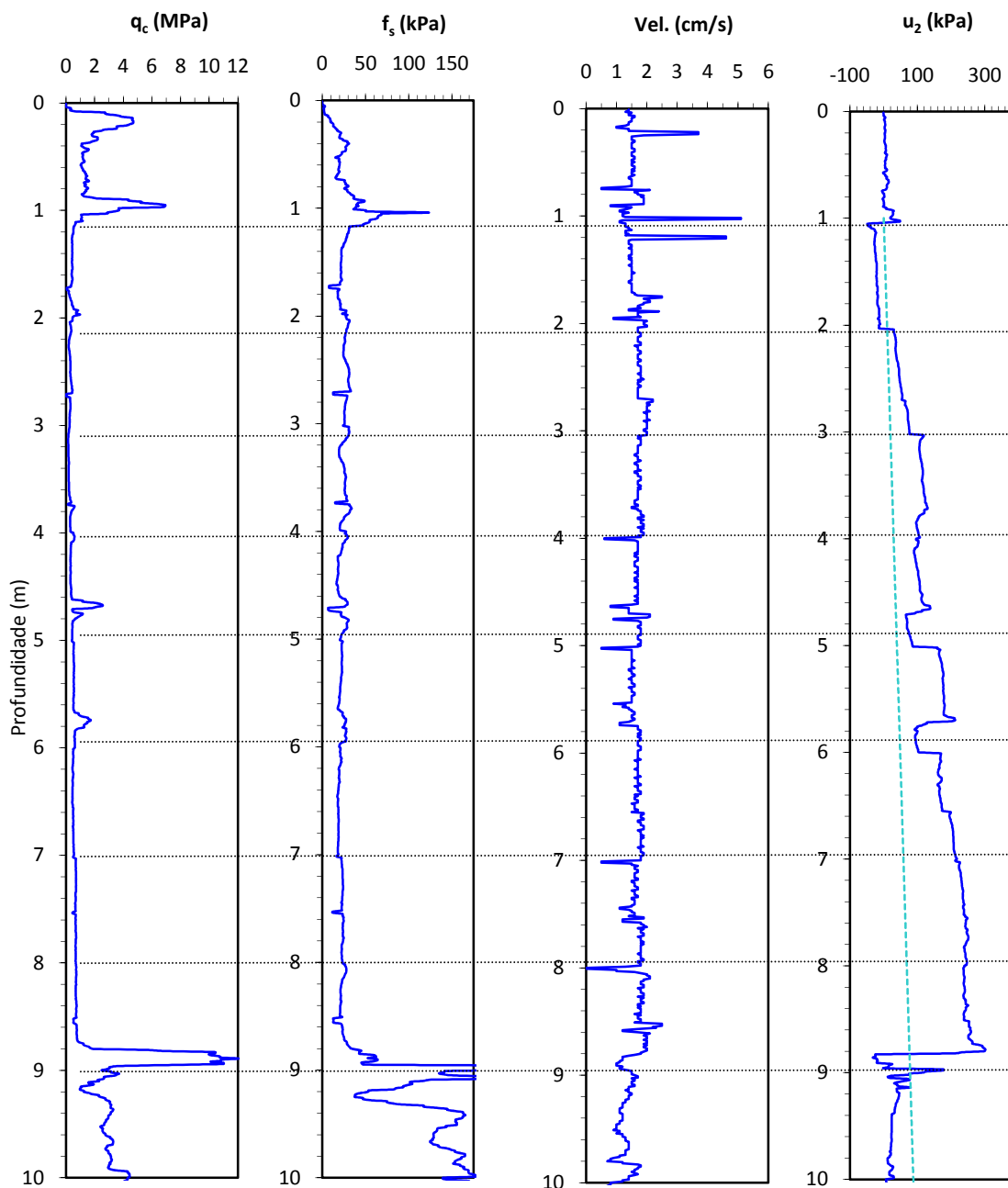


Figura 32 - Valores obtidos no ensaio CPTu-2

Como pode ser notado, na análise do registo da poro-pressão (u_2), quando se efectua paragem (marcadas a tracejado na figura 33) para aquisição de dados sísmicos, em comparação com os dados apresentados no ponto 5 existe uma dissipação da poro-pressão, como pode ser observado na figura 33 à direita. Como o tempo de paragem entre pontos, além do tempo de paragem para mudança de varas, existe um tempo para a aquisição dos dados sísmicos, o registo de poro-pressão sofre uma pequena dissipação o que pode comprometer a caracterização adequada dos solos em apreço.

6.1.1. Análise das velocidades das ondas de corte

Para a avaliação da velocidade de propagação das ondas de corte, foram utilizados, à semelhança do que aconteceu no ensaio SCPTu-1, os dois métodos interpretativos já enunciados. Os resultados obtidos, relativos às 3 fontes sísmicas, foram interpretados individualmente, de modo a que se obtivesse o valor mais exacto da velocidade (tabela 8).

Tabela 8 - Valores das Velocidades de corte SCPTu-2 para um afastamento de 2,0m

		Correlação Cruzada				Polaridade Inversa	Velocidade Adoptada
	Profundidade	Esquerda		Direita			
	Média	V_s (m/s)	R^2	V_s (m/s)	R^2	V_s (m/s)	V_s (m/s)
Fonte de 2,0m	1,5	148,09	0,49	65,82	0,43	0	148,09
	2,5	111,02	0,79	102,73	0,76	141,73	141,73
	3,5	78,78	0,90	72,22	0,98	51,83	72,22
	4,5	91,30	0,98	91,30	0,99	57,58	91,30
	5,5	78,28	0,99	104,38	0,98	47,72	78,28
	6,5	95,56	0,94	68,25	0,91	34,32	95,56
	7,5	80,51	0,78	96,61	0,92	58,07	96,61
	8,5	139,05	0,68	121,67	0,92	60,92	121,67
	9,5	326,16	0,80	326,16	0,96	91,81	324,16
Fonte de 1,5m	1,5	118,47	0,58	74,04	0,79	-	74,04
	2,5	86,35	0,44	97,14	0,83	78,60	78,60
	3,5	72,22	0,97	72,22	0,92	50,75	72,22
	4,5	-	-	101,45	0,90	60,37	101,45
	5,5	93,94	0,93	-	-	48,28	93,94
	6,5	106,17	0,90	79,63	0,94	58,69	79,63
	7,5	80,51	0,75	80,51	0,91	53,73	80,51
	8,5	121,67	0,77	121,67	0,90	70,60	121,67
	9,5	195,70	0,85	244,62	0,92	109,76	244,62
Fonte de 1,0m	1,5	53,85	0,72	84,62	0,72	158,42	158,42
	2,5	70,65	0,61	97,14	0,71	82,16	82,16
	3,5	108,32	0,82	86,66	0,82	53,40	53,40
	4,5	83,00	0,90	83,00	0,92	95,16	83,00
	5,5	73,50	0,86	104,38	0,82	46,17	73,5
	6,5	95,56	0,97	73,50	0,86	38,99	95,56
	7,5	87,83	0,72	96,61	0,84	59,83	96,61
	8,5	121,67	0,75	108,15	0,90	40,77	108,15
	9,5	244,62	0,71	978,49	0,97	123,66	244,62

O conjunto dos resultados evidencia valores de coeficiente de correlação muito idênticos, o que dificultou a admissão de um valor para a velocidade das ondas de corte. De modo a contornar esta dificuldade projectaram-se os valores de coeficiente de correlação (R^2) (figura 34) em profundidade, de modo a observar se existe alguma lei de evolução do factor R^2 para cada uma

das fontes, e assim assumir valores para a velocidade das ondas de corte pela fonte que em profundidade gerasse valores mais fiáveis.

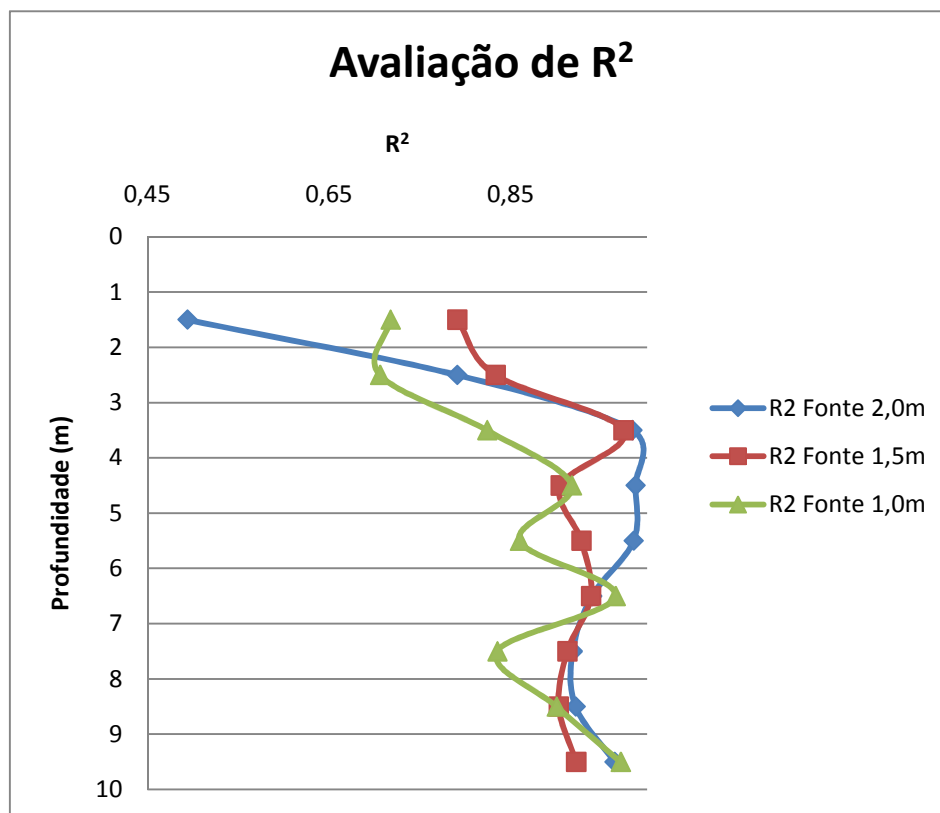


Figura 33 - Avaliação do factor R2 em profundidade para as 3 fontes

Dessa análise, observa-se que para as três fontes, os valores abaixo de 6,0m de profundidade, indicam uma equivalência entre as fontes de 1,5m e de 2,0m. No trecho intermédio das profundidades atravessadas, entre os 3,0m e os 6,0m, o valor que gera melhor coeficiente de correlação é efectivamente a fonte de 2,0m. No início dos materiais atravessados (entre 1,0m e os 3,0m), essa mesma fonte gera valores inferiores às restantes fontes, sendo que a fonte de 1,5m apresenta melhores resultados.

Segundo o documento “Seismic cone downhole to measure shear wave velocity – a guideline prepared by ISSMGE TC10: Geophysical testing in Geotechnical Engineering”, indica-nos que o procedimento de aquisição das ondas sísmicas deve ser executado, preferencialmente a profundidades abaixo dos 2,0m ou 3,0m, de maneira a evitar o registo da influência das ondas de superfície.

De acordo com esta análise verificou-se que efectivamente a onda que gerou melhores valores de fiabilidade, neste caso foi a fonte de 2,0m.

Refira-se que quando os valores provenientes da análise pela correlação cruzada geraram factores de correlação inferiores a 0,85, socorremo-nos do método da polaridade inversa para avaliação da velocidade da onda de corte. Quando tal acontece é necessário ter em consideração a qualidade do registo sísmico. De facto a amplitude da onda (figuras 35 a 37) é um factor importante, visto que para o utilizador, uma maior amplitude de onda significa normalmente menor dificuldade na marcação da primeira chegada da onda.

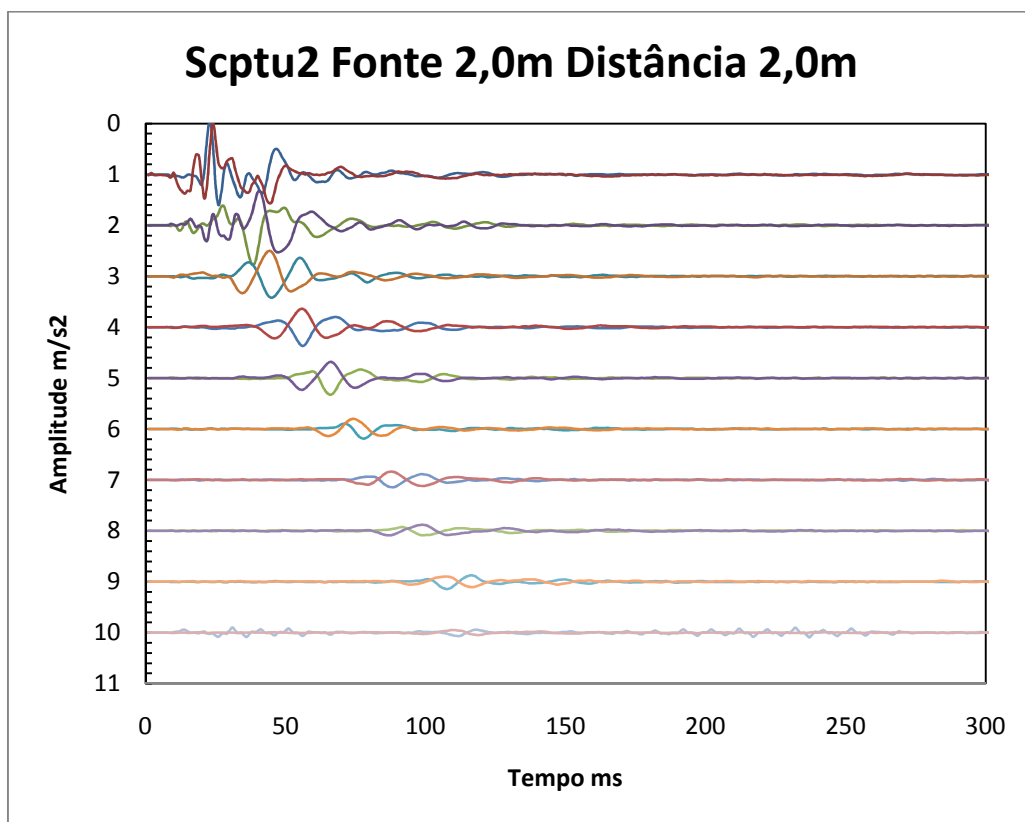


Figura 34 - Avaliação de amplitude da onda para a fonte de 2,0m

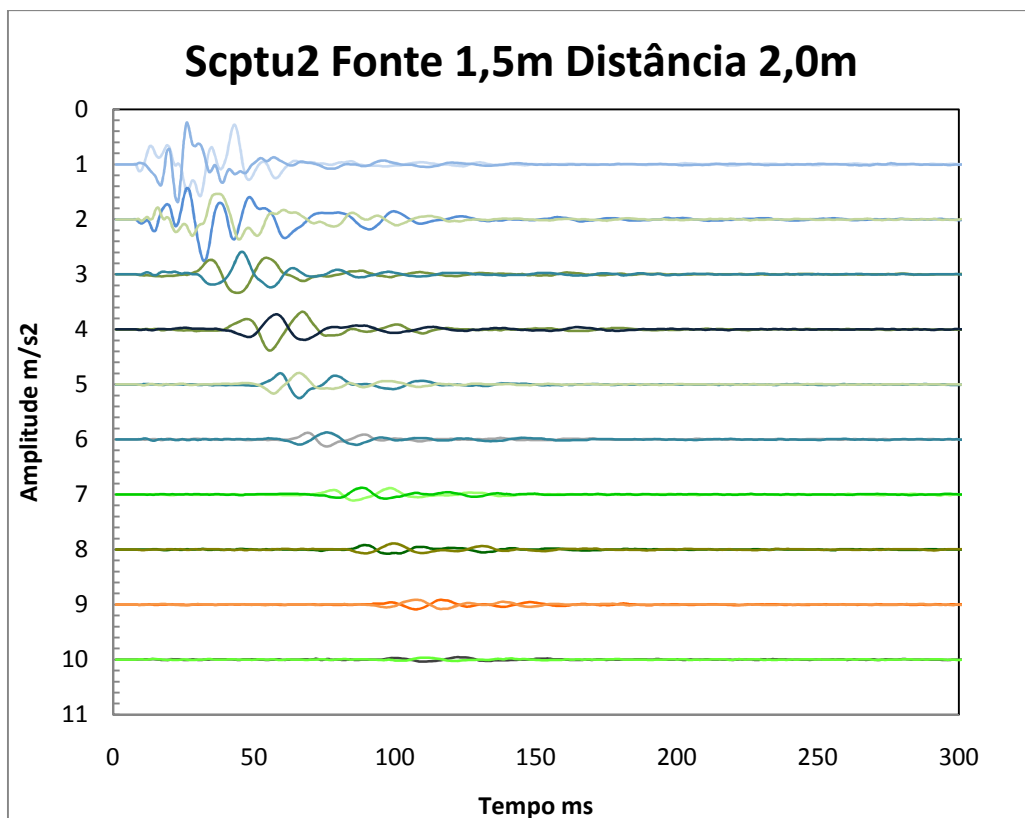


Figura 35 - Avaliação de amplitude da onda para a fonte de 1,5m

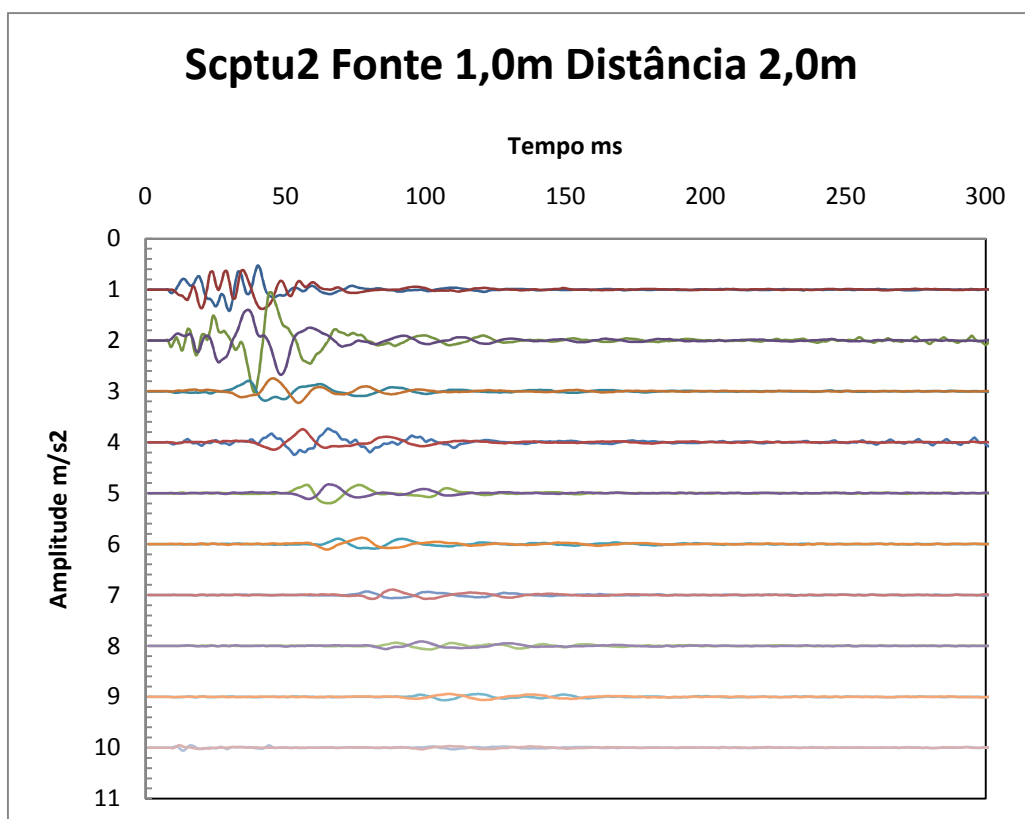


Figura 36 - Avaliação de amplitude da onda para a fonte de 1,0m

Da análise grosseira às amplitudes de ondas apresentadas, constata-se em primeiro lugar, que as amplitudes, em profundidade diminuem em todas as fontes, tornando a marcação da chegada da onda mais difícil de interpretar.

De modo a analisar, de forma comparativa, os diversos registos sísmicos promovidos pelas diferentes fontes, no que diz respeito à sua amplitude, efectuou-se a projecção conjunta desses registos às diferentes profundidades. A título de exemplo apresentam-se nas próximas figuras alguns registos (figuras 38 a 43).

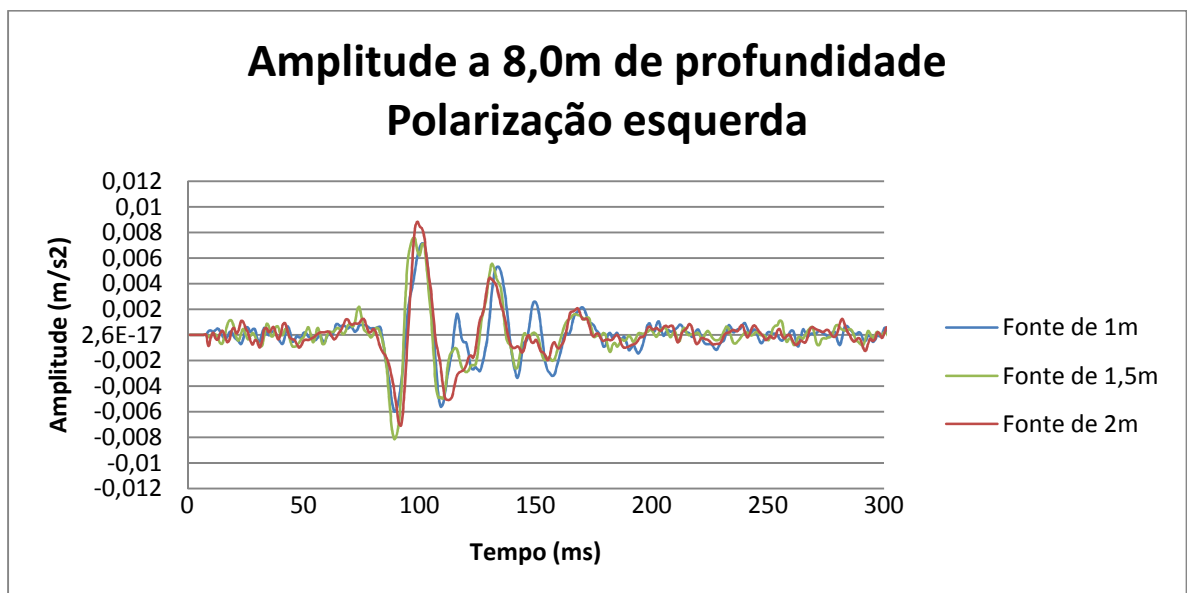


Figura 37 - Avaliação da amplitude de onda, com polarização esquerda para as 3 fontes a 8,0m de profundidade

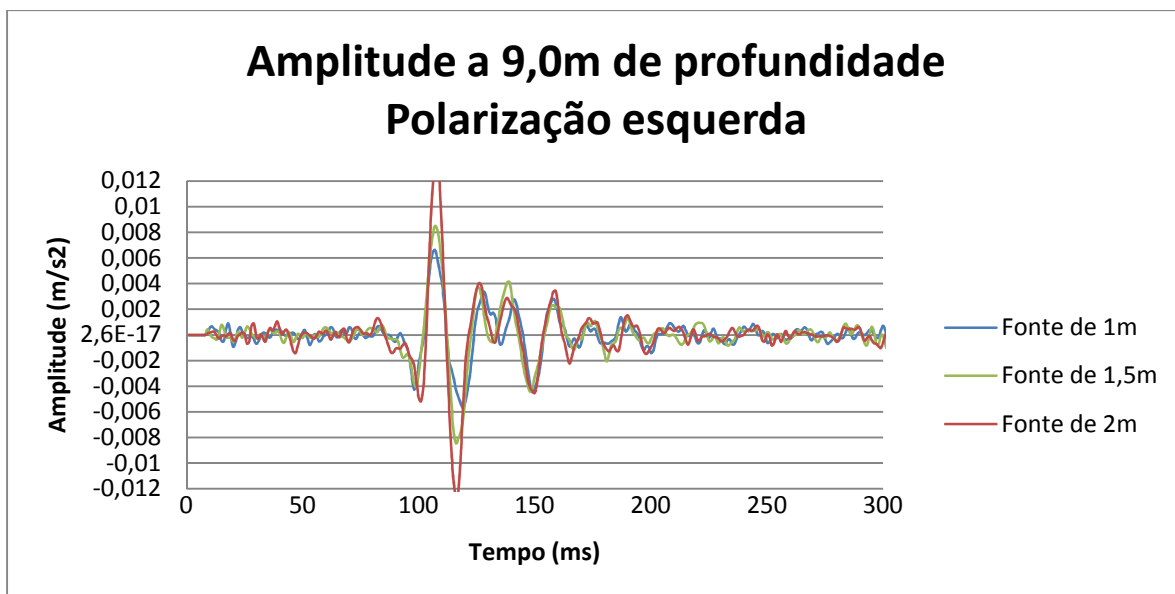


Figura 38 - Avaliação da amplitude de onda, com polarização esquerda para as 3 fontes a 9,0m de profundidade

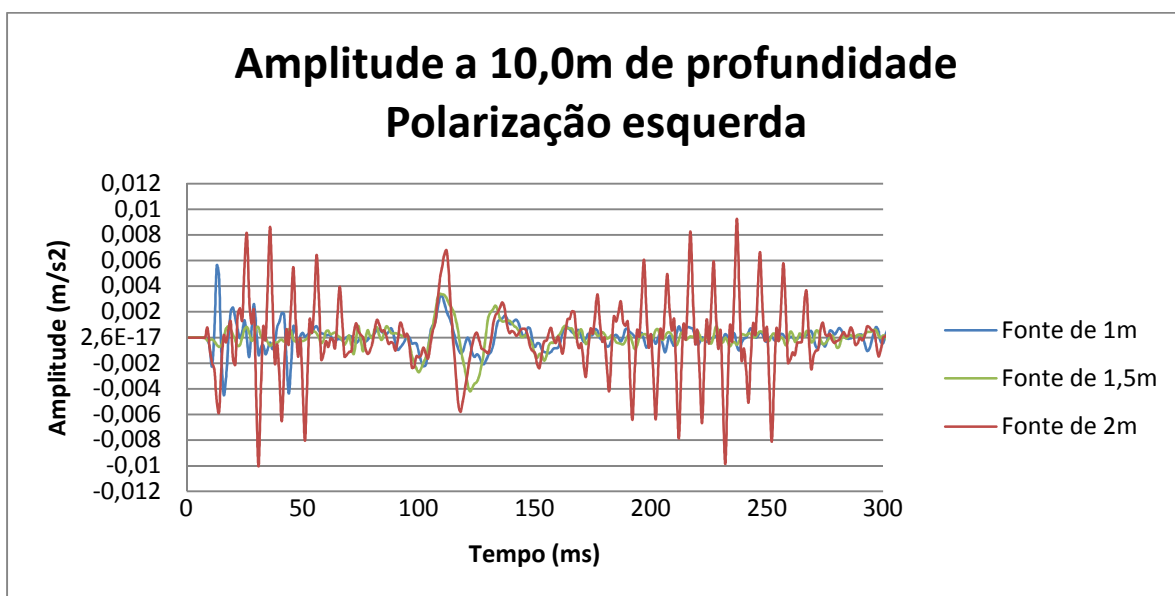


Figura 39 - Avaliação da amplitude de onda, com polarização esquerda para as 3 fontes a 10,0m de profundidade

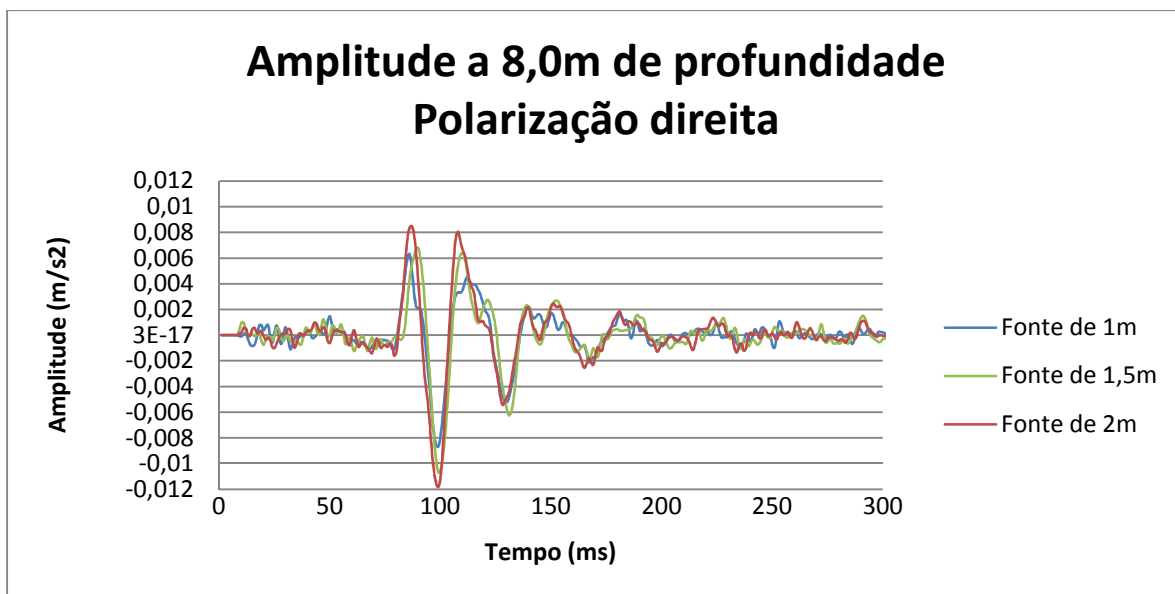


Figura 40 - Avaliação da amplitude de onda, com polarização direita para as 3 fontes a 8,0m de profundidade

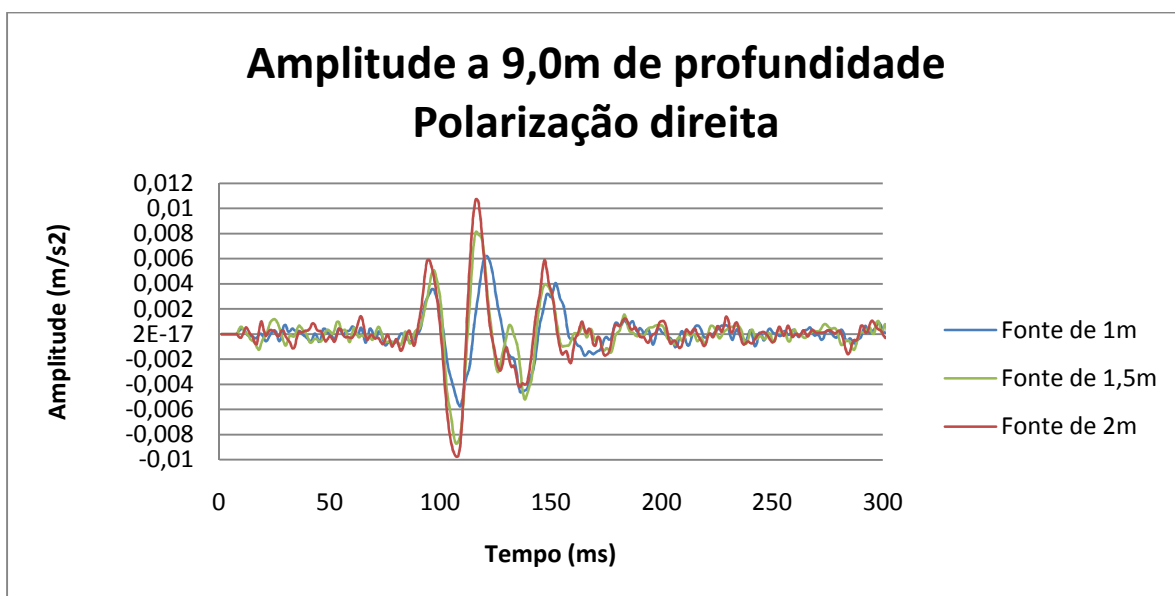


Figura 41 - Avaliação da amplitude de onda, com polarização direita para as 3 fontes a 9,0m de profundidade

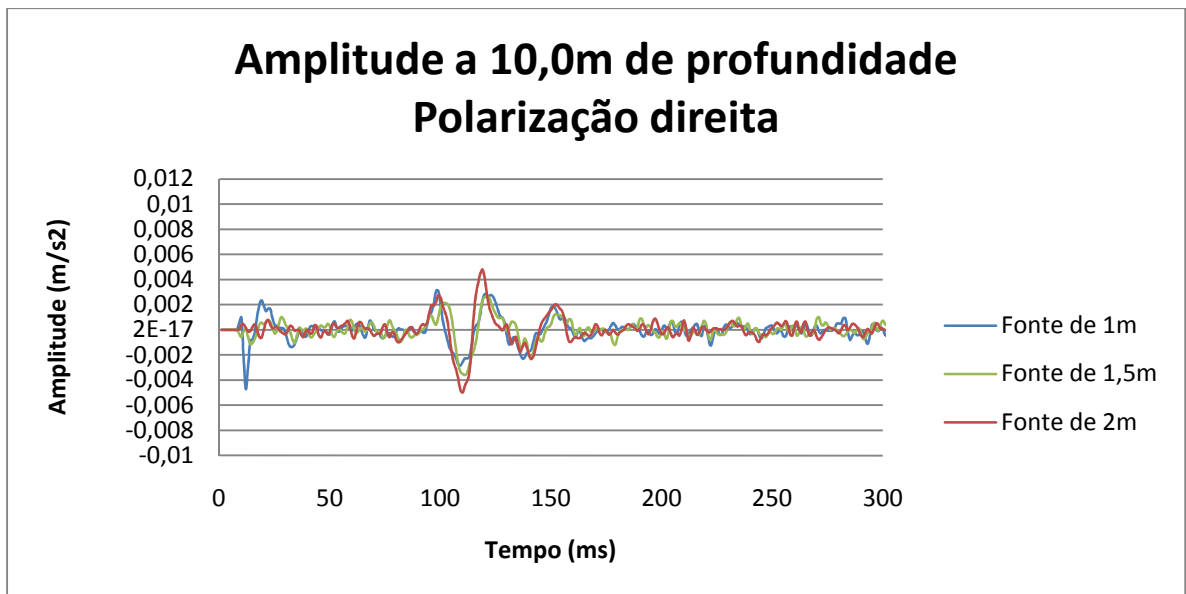


Figura 42 - Avaliação da amplitude de onda, com polarização direita para as 3 fontes a 10,0m de profundidade

Da observação das figuras, é possível verificar que a fonte de maiores dimensões produz sempre uma onda de maior amplitude à chegada do sinal em relação as outras duas fontes, tendo a amplitude um decréscimo directamente proporcional à sua dimensão.

Nesta análise deve ser considerado que à medida que aumenta a dimensão da fonte a tensão normal no plano onde é mobilizado o corte é menor, já que a carga morta que promovia essa tensão normal era constante. Mesmo assim a amplitude cresceu com a dimensão da fonte.

Tendo em consideração que a fonte que gerou resultados mais fiáveis foi a de 2,0 m de comprimento, já que foi esta a que melhor sinal sísmico produziu, adoptaram-se como velocidades das ondas de corte de referência as provenientes desta fonte (figura 44).

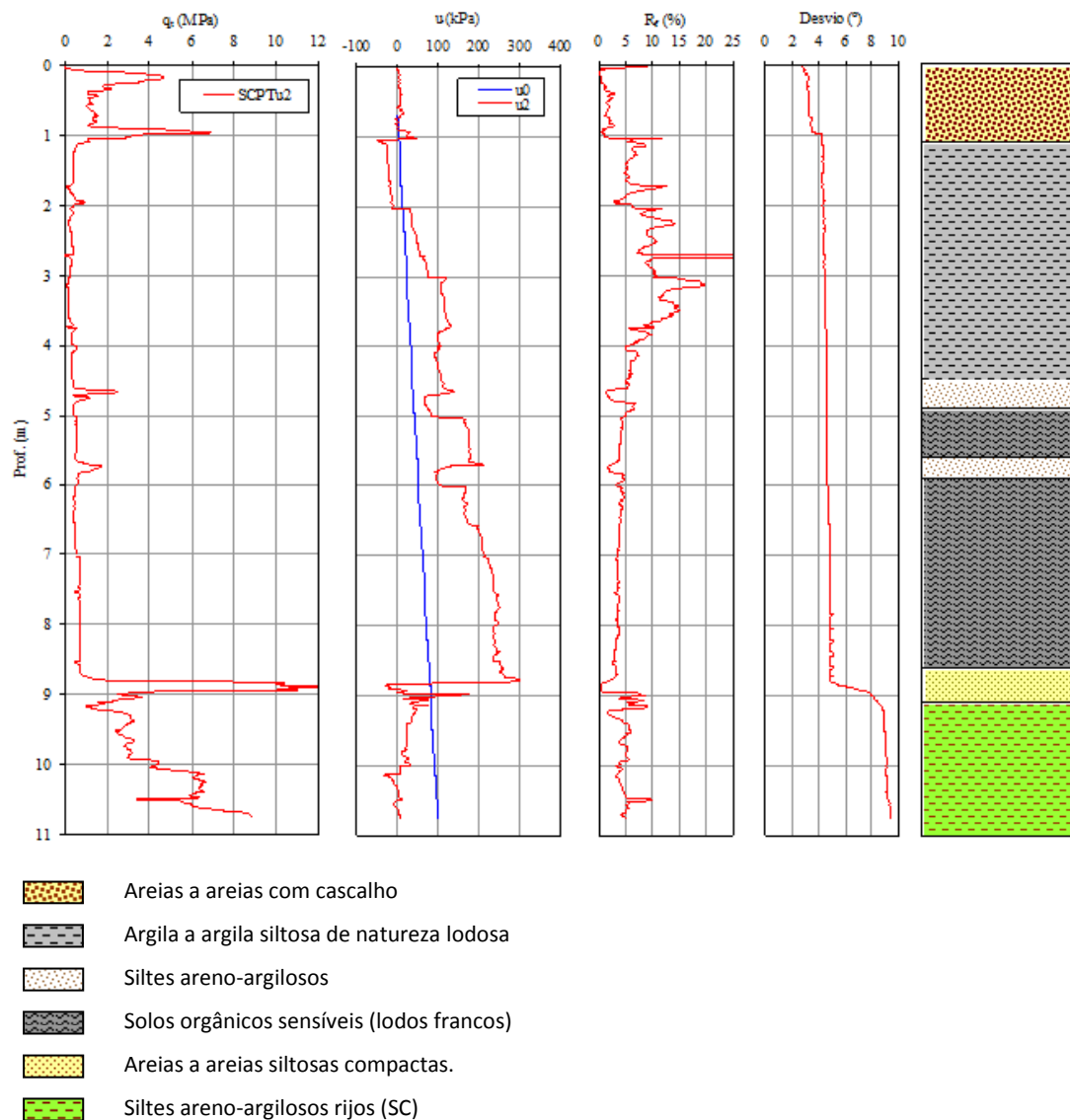


Figura 43 - Valores obtidos após tratamento das velocidades de corte do SCPTu-2, para a fonte de 2,0m

Com a adopção destes valores passou-se a caracterizar o local do ensaio segundo métodos já descritos.

6.1.2. Caracterização das formações atravessadas

Conforme já foi previamente exemplificado, a caracterização adoptada segue a projecção dos dados (figura 45), sobre a carta de classificação de Robertson (1990).

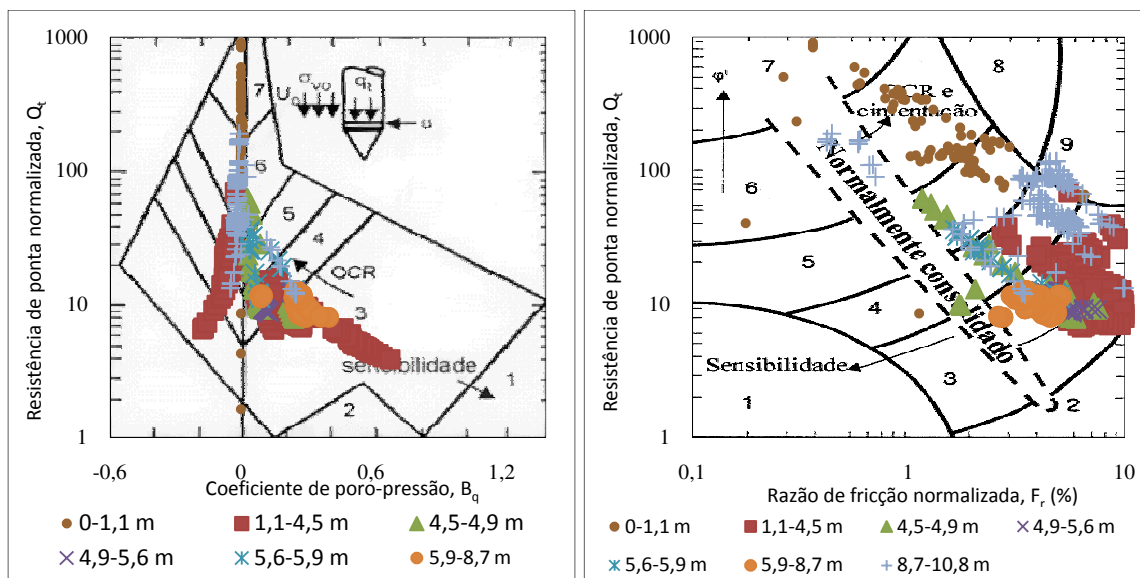


Figura 44 - Projecção dos dados do ensaio CPTu2 sobre Carta de Robertson, 1990

Desta projecção, podemos verificar que estamos perante um perfil que compreende uma primeira camada de espessura de aproximadamente 1,0m de areias a areias com cascalho, seguida de uma camada, com uma espessura de aproximadamente 3,4m de siltes areno-argilosos, até aos 4,5m de profundidade. Desde esta profundidade até aos 5,9m surgem argilas a argilas siltosas onde intercala dos 4,9m até ao 5,6 uma camada areno-siltosa a silte arenosa. Segue-se uma camada de natureza arenosa que repousa num material mais cimentado ou sobreconsolidado de natureza siltosa.

Nos que diz respeito aos restantes parâmetros geotécnicos que caracterizam o meio atravessado, ficam alguns dos dados em forma de uma tabela (tabela 9),

Tabela 9 - Tabela de parâmetros obtidos no ensaio SCPTu-2

Autor	Parâmetro		Valores obtidos						
			0,0 – 1,1m	1,1-4,5m	4,5-4,9m	4,9-5,6m	5,6-5,9m	5,9-8,7m	8,7-10,8m
Jamiolkowski <i>et al.</i> , (1985)	Dr	%	43	13	-	15	-	15	37
de Mello	ϕ'	°	35	28	-	28	-	28	33
Clausen Denver	ϕ'	°	47	27	-	27	-	27	36
Robertson Campanella	ϕ'	°	44	26	-	27	-	26	37
Kulhawy Mayne	ϕ'	°	37	26	-	27	-	28	36
Baldi e tal (1989)	E's	Mpa	7	3	5	4	6	5	17
Vesic (1970)	M	Mpa	6	1	2	1	2	1	11
Powel e Quaterman (1988)	Cu	Kpa	-	-	72	-	84	-	-

Quanto aos valores obtidos relativamente ao módulo distorcional, são apresentados na imagem que se segue (figura 45).

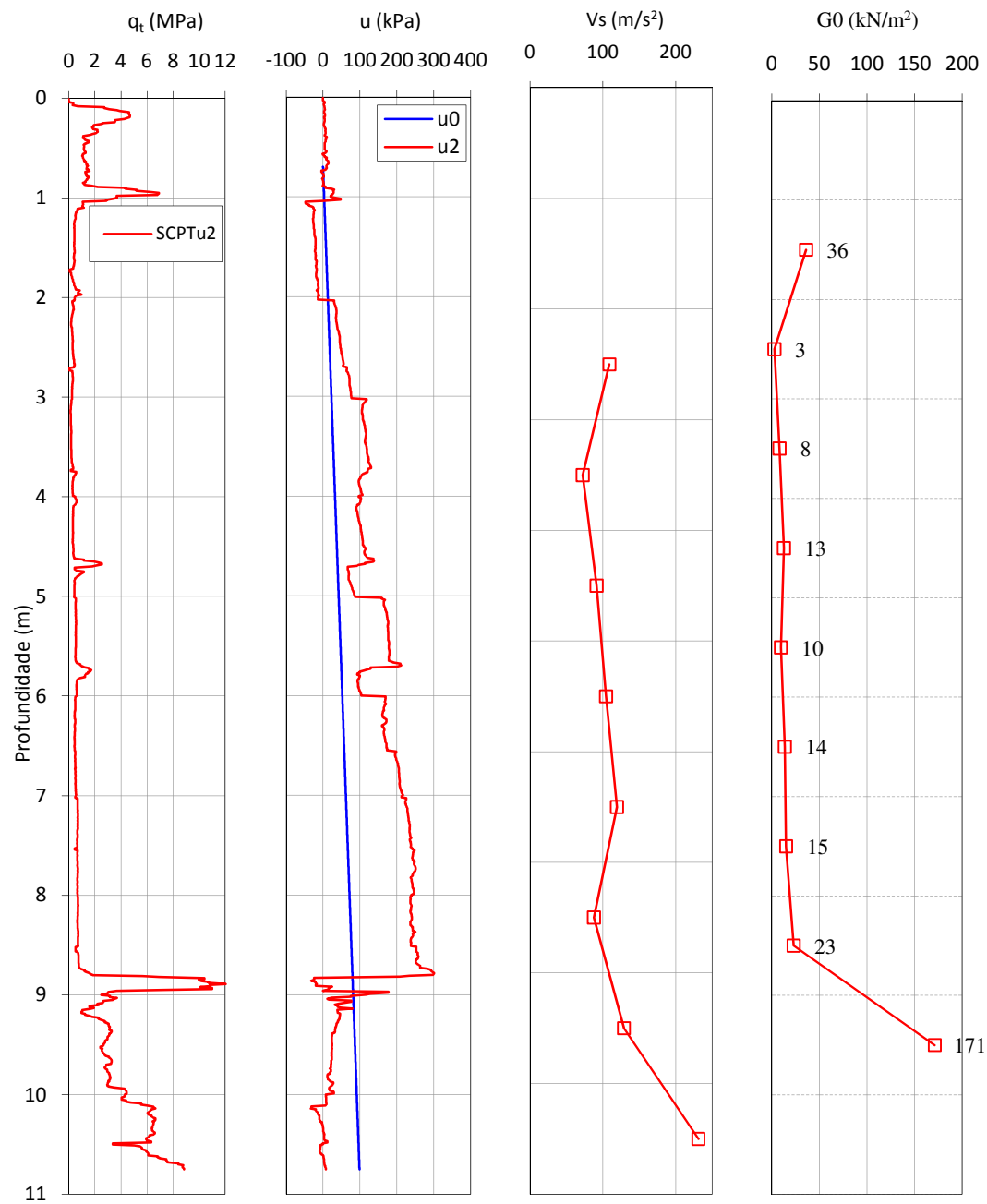


Figura 45 - Valores obtidos após tratamento das velocidades de corte do SCPTu-2, para a fonte de 2,0m

Da análise aos resultados obtidos (figura 46), é possível concluir que os valores das velocidades das ondas de corte, são idênticos aos valores do primeiro ensaio.

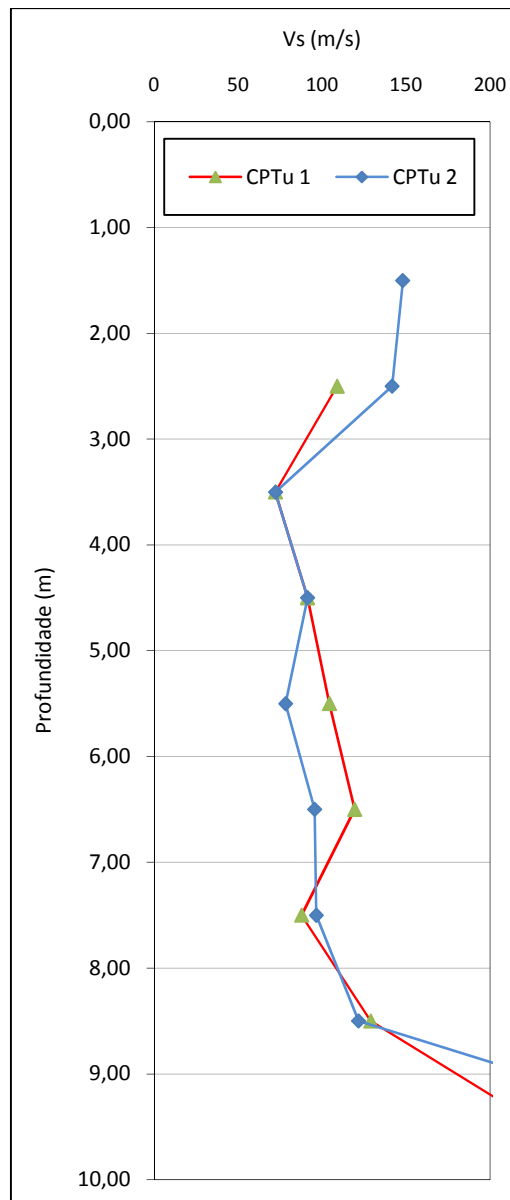


Figura 46 - Comparação das velocidades SCPTu-1 e SCPTu-2

Foi ainda possível verificar no campo, que a realização do ensaio SCPTu segundo a metodologia tradicional de aquisição do registo sísmico, envolveu um tempo de execução maior do que o ensaio SCPTu em que se utilizou a aquisição do registo sísmico na fase ascendente.

Na análise aos registos de amplitude das ondas geradas, constatou-se que nas fontes de maior dimensão a amplitude gerada na onda é maior do que para as de menor dimensão. Foi também possível verificar, na análise aos valores do factor de fiabilidade gerado pelo método de análise da correlação cruzada, que em maiores profundidades os factores gerados nesse coeficiente, são idênticos, mas que nos valores intermédios esse factor, torna-se maior e portanto mais fiável na fonte de maiores dimensões.

7. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO AFASTAMENTO DA FONTE

7. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO AFASTAMENTO DA FONTE

7.1. ENSAIO SCPTu-3

O objectivo principal desta última série de ensaios, teve como base a avaliação da influência da distância da fonte sísmica ao ponto de cravação do piezocone. Para tal o ensaio foi executado com 2 fontes de comprimentos distintos, 1,0m e 2,0m, mas a 4 distâncias diferentes (1,0m, 2,0m, 3,0m e 4,0m), de tal modo que fosse possível, verificar a variação sinal sísmico registado.

Os registos sísmicos no ensaio SCPTu-3, foram obtidos na fase ascendente do trem de varas, após a conclusão do ensaio CPTu propriamente dito, ou seja, de modo distinto do convencional para a execução deste tipo de ensaios, em que a aquisição das ondas de corte se faz aquando mudança de vara durante a execução do ensaio CPTu.

Após a experiência efectuada no ensaio SCPTu-1, verificou-se que os resultados eram satisfatórios e que era possível a execução por este método sem o prejuízo da qualidade dos dados obtidos, sendo até que em comparação com o ensaio SCPTu-2, a sua execução fora mais rápida, o que para a variação das fontes e em distância, neste ensaio, o factor tempo era essencial. Com as variações a aumentar, o aumento da dissipação da poro-pressão seria maior, devido ao tempo de aquisição para as duas fontes em quatro distâncias.

Posto isto, foi realizado o ensaio, sem interrupções para a aquisição do sinal sísmico, fazendo somente a mudança de vara, de onde originou os resultados (figura 47) relativos ao ensaio CPTu-3.

Desta análise, igualmente ao que tinha sido efectuada no ensaio CPTu-1, através da visualização dos gráficos apresentados aquando da execução do ensaio CPTu (figura 47), é possível uma prévia interpretação das formações atravessadas e se necessário efectuar alguma paragem intermédia para melhor caracterizar algum patamar.

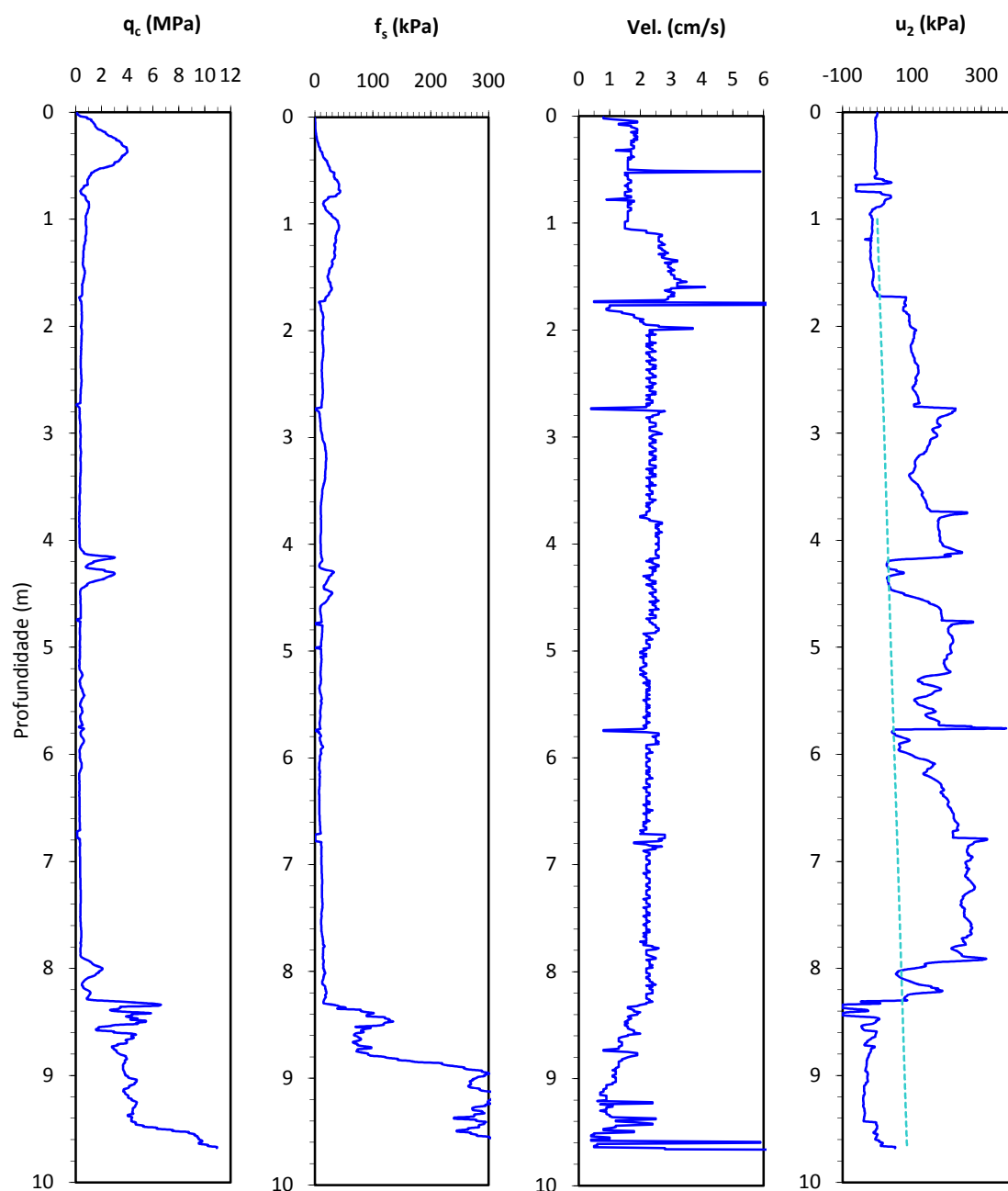


Figura 47 - Valores obtidos no ensaio Cptu-3

Neste ensaio, também não foi necessário efectuar nenhuma paragem, além das preconizadas de metro a metro. O registo é equivalente ao obtido no ensaio CPTu-1, apenas com uma camada areno- siltosa ou silto arenosa na zona dos 4,0m em que poderia existir alguma dúvida.

Foi efectuada então o registo das velocidades das ondas de corte de metro a metro, fazendo variar as fontes de 1,0m e 2,0m, distanciadas até 4,0m ao ponto de cravação.

Não foi utilizada a fonte de 1,5m, para que a avaliação do registo em amplitude tivesse algum significado. Foi verificado no ensaio CPTu-2, que a fonte de 1,5m apresenta amplitudes

intermédias relativamente às outras duas fontes, sendo que nesta avaliação suprimiu-se o uso da fonte intermédia.

7.1.1. Avaliação das velocidades de corte

Foram tratados os dados das velocidades pelos métodos já descritos anteriormente que resultou nas seguintes tabelas de dados (tabela 10 e 11) e respectiva velocidade adoptada para cada fonte relativamente à distância executada.

Tabela 10 - Valores das Velocidades de corte SCPTu-3 para a fonte de 2,0m

		Correlação Cruzada				Polaridade Inversa	Velocidade adotada
	Profundidade	Esquerda		Direita			
	média	V_s (m/s)	R^2	V_s (m/s)	R^2	V_s (m/s)	V_s (m/s)
Fonte de 2,0m com afastamento de 1,0m	1,5	83,86	0,51	73,71	0,59	73,07	73,07
	2,5	90,36	0,83	71,80	0,77	87,29	87,29
	3,5	83,55	0,89	104,44	0,75	92,43	83,55
	4,5	101,66	0,87	98,08	0,95	94,49	98,08
	5,5	109,92	0,92	101,94	0,95	98,21	101,94
	6,5	103,49	0,93	95,49	0,95	101,44	95,49
	7,5	99,62	0,98	127,08	0,95	112,30	99,62
	8,5	160,18	0,94	124,14	0,95	139,24	124,14
Fonte de 2,0m com afastamento de 2,0m	1,5	134,63	0,66	124,71	0,61	109,51	109,51
	2,5	64,23	0,65	53,41	0,61	86,99	86,99
	3,5	68,50	0,80	88,88	0,68	86,10	86,10
	4,5	120,93	0,79	95,11	0,80	94,48	94,48
	5,5	103,80	0,98	109,23	0,89	98,16	103,80
	6,5	106,17	0,98	0,06	0,87	101,41	106,17
	7,5	87,83	0,87	93,80	0,88	112,33	93,80
	8,5	160,18	0,94	124,14	0,95	139,12	124,14
Fonte de 2,0m com afastamento de 3,0m	1,5	8865,40	0,41	233,30	0,60	47,38	47,38
	2,5	28,83	0,74	386,11	0,56	53,11	53,11
	3,5	74,99	0,65	100,98	0,61	88,82	88,82
	4,5	91,82	0,83	85,67	0,61	94,56	94,56
	5,5	80,48	0,82	93,32	0,87	84,30	93,32
	6,5	115,61	0,86	99,19	0,87	106,65	99,19
	7,5	95,20	0,86	92,36	0,82	99,76	95,20
	8,5	176,23	0,97	349,20	0,91	193,44	176,23
Fonte de 2,0m com afastamento de 4,0m	1,5	23,11	0,27	2326,80	0,62	45,14	45,14
	2,5	117,30	0,68	28,61	0,47	65,33	65,33
	3,5	132,30	0,46	68,78	0,87	96,54	96,54
	4,5	116,60	0,82	94,46	0,87	87,74	94,46
	5,5	126,25	0,92	144,28	0,86	105,43	126,25
	6,5	125,17	0,71	105,08	0,65	112,22	112,22
	7,5	96,39	0,66	90,93	0,68	107,85	107,85
	8,5	296,59	0,95	3618,30	0,98	437,31	296,59

Tabela 11 - Valores das Velocidades de corte SCPTu-3 para a fonte de 1,0m

		Correlação Cruzada				Polaridade Inversa	Velocidade adotada
	Profundidade	Esquerda		Direita			
	média	V_s (m/s)	R^2	V_s (m/s)	R^2	V_s (m/s)	V_s (m/s)
Fonte de 1,0m com afastamento de 1,0m	1,5	97,26	0,65	357,33	0,61	324,29	324,29
	2,5	153,09	0,69	63,01	0,75	64,49	64,49
	3,5	82,45	0,92	77,80	0,90	85,25	82,47
	4,5	106,08	0,97	102,19	0,94	101,15	106,08
	5,5	104,10	0,91	104,10	0,90	93,34	104,10
	6,5	109,81	0,97	108,60	0,94	111,72	109,81
	7,5	100,63	0,97	110,75	0,96	105,21	100,63
	8,5	140,87	0,93	128,15	0,96	136,95	128,15
Fonte de 1,0m com afastamento de 2,0m	1,5	21,90	0,46	110,72	0,28	-	21,90
	2,5	156,99	0,63	58,21	0,72	109,33	109,33
	3,5	87,98	0,89	76,02	0,96	85,83	76,02
	4,5	85,73	0,75	93,17	0,85	90,79	93,17
	5,5	106,15	0,92	118,16	0,62	102,99	106,15
	6,5	111,11	0,95	94,61	0,93	102,46	111,11
	7,5	90,29	0,89	99,09	0,93	100,14	99,09
	8,5	133,33	0,79	147,47	0,98	138,87	147,47
Fonte de 1,0m com afastamento de 3,0m	1,5	59,10	0,64	-	-	58,30	58,30
	2,5	70,01	0,87	-	-	65,58	70,11
	3,5	63,11	0,77	81,00	0,82	8,96	81,00
	4,5	85,67	0,86	96,06	0,67	94,98	85,67
	5,5	96,93	0,86	113,93	0,86	97,78	96,93
	6,5	97,59	0,83	97,07	0,86	95,09	97,07
	7,5	108,56	0,77	98,75	0,88	104,04	98,75
	8,5	152,07	0,90	166,87	0,95	155,73	166,87
Fonte de 1,0m com afastamento de 4,0m	1,5	36,55	0,22	58,66	0,54	58,30	58,30
	2,5	91,80	0,75	65,98	0,43	62,85	62,85
	3,5	63,77	0,93	63,16	0,84	61,83	63,77
	4,5	119,40	0,85	84,80	0,94	93,68	84,80
	5,5	136,95	0,91	146,91	0,95	98,21	146,91
	6,5	108,43	0,78	109,12	0,59	95,92	95,92
	7,5	92,84	0,67	90,46	0,72	103,98	103,98
	8,5	278,33	0,96	217,97	0,90	155,76	278,33

Como resultado desta recolha de velocidades, devido à quantidade de dados gerados, houve a necessidade de verificar em qual das distâncias a qual das fontes, seria melhor a qualidade do sinal gerado.

Para tal, foram efectuadas as seguintes verificações:

- Avaliação das velocidades das ondas de corte à origem, relativamente a cada fonte para à distância testada (figura 48 e 49);

- Avaliação da amplitude de ondas sísmicas em profundidade, em cada fonte à distância correspondente à origem (figura 50 a 57);
- Avaliação da amplitude de onda polarizadas de esquerda e de direita à respectiva profundidade, para cada fonte e respectiva distância (figura 58 a 61);
- Evolução do R^2 para cada fonte (figura 62), ou seja a evolução da fiabilidade da velocidade gerada no método de correlação cruzada, relativamente ao seu afastamento ao ponto de cravação.

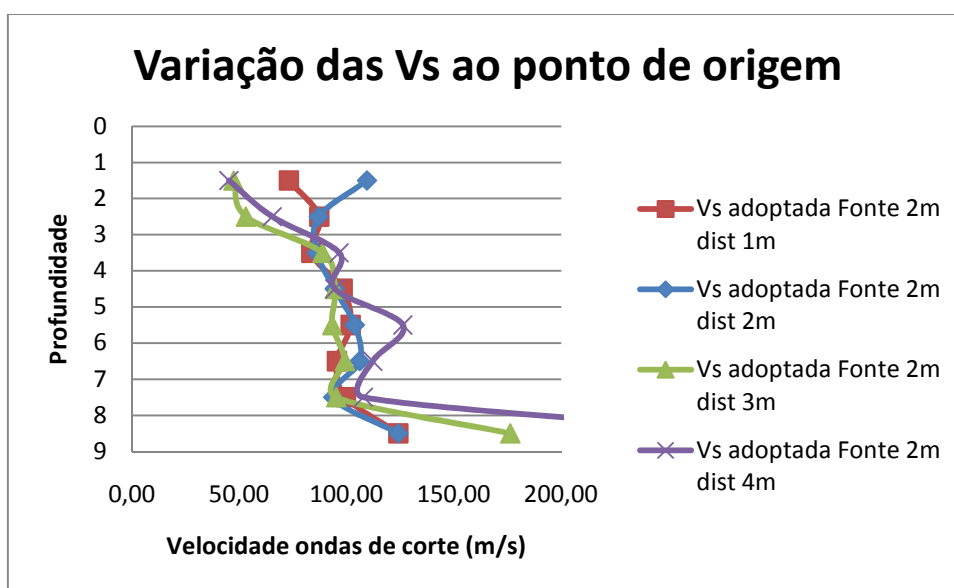


Figura 48 - Variação das Vs em profundidade para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

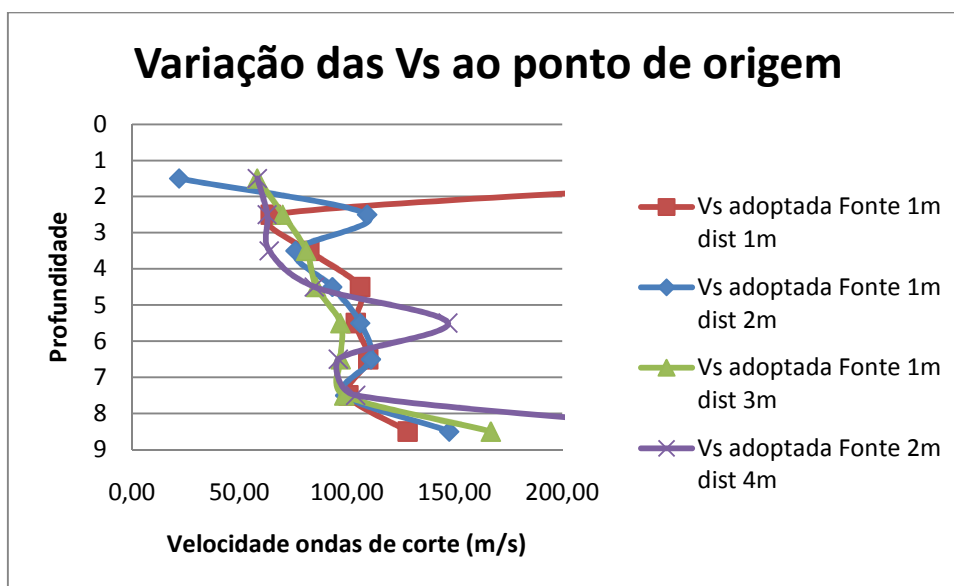


Figura 49 – Variação das Vs em profundidade para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

Desta análise, pode-se observar que as velocidades são equiparadas em profundidade para todos os afastamentos, com exceção dos primeiros metros na fonte de 1,0m a 1,0m de distância, entre os 5,0 e os 6,0 m e parte final em ambas as fontes a 4,0m de afastamento.

Esta última é um caso em que se terá que ter em atenção, porque na realidade, quanto maior o afastamento da fonte ao seu ponto de cravação, pode implicar o registo de uma onda sísmica de uma formação diferente, no caso de estruturas não horizontais. Assim, sendo as velocidades registadas nas diferentes fontes, todas na mesma ordem de grandeza, assumiu-se que os valores para a velocidade da onda para este afastamento, induz em erro das formações atravessadas. Formações essas que já eram conhecidas devidos aos ensaios realizados anteriormente e seriam de esperar velocidades das ondas de corte na mesma ordem de grandeza.

Passando então à análise da amplitude de onda do sinal sísmico registado, para verificar a qualidade do sinal das restantes 3 fontes, avaliaram-se as amplitudes em profundidade em relação ao seu afastamento (figuras 50 a 61).

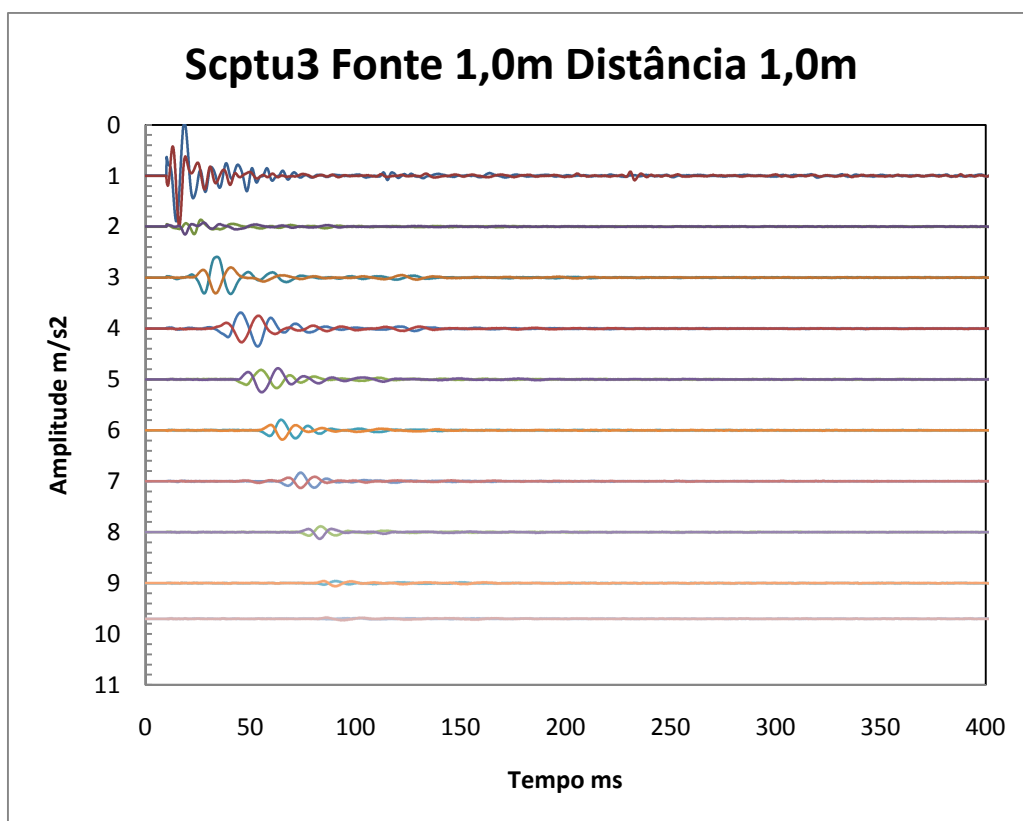


Figura 50 - Avaliação de amplitude da onda para a fonte de 1,0m a 1,0m de distância

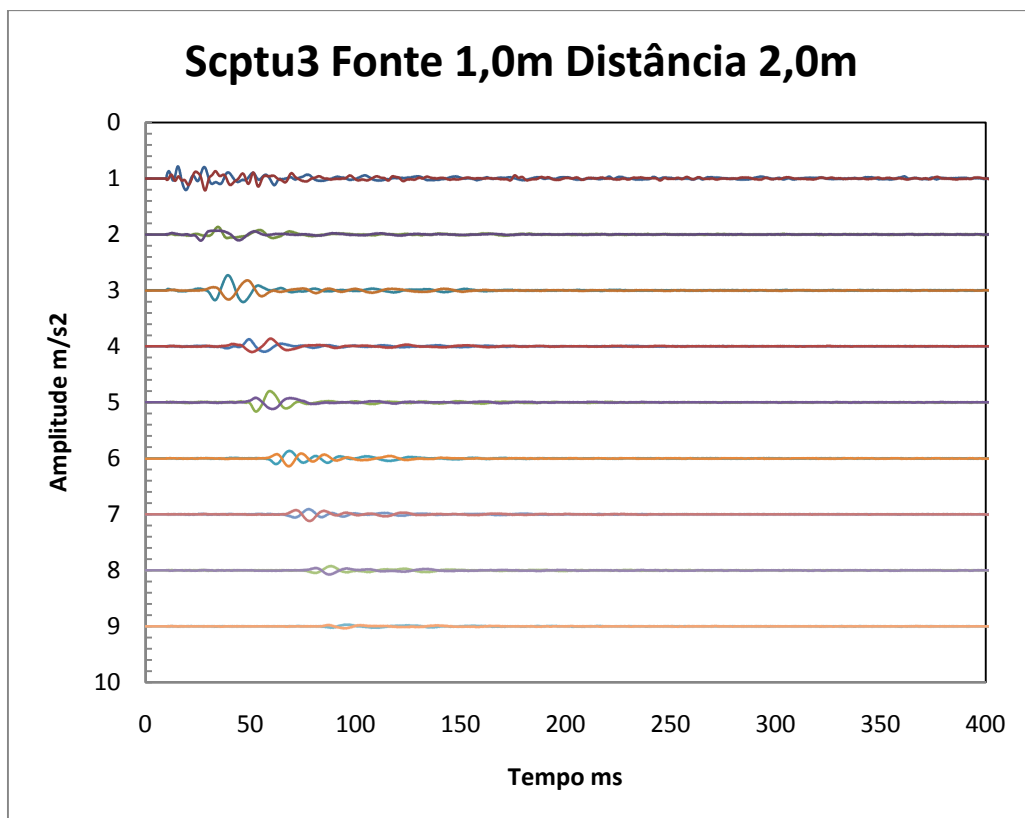


Figura 51 - Avaliação de amplitude da onda para a fonte de 1,0m a 2,0m de distância

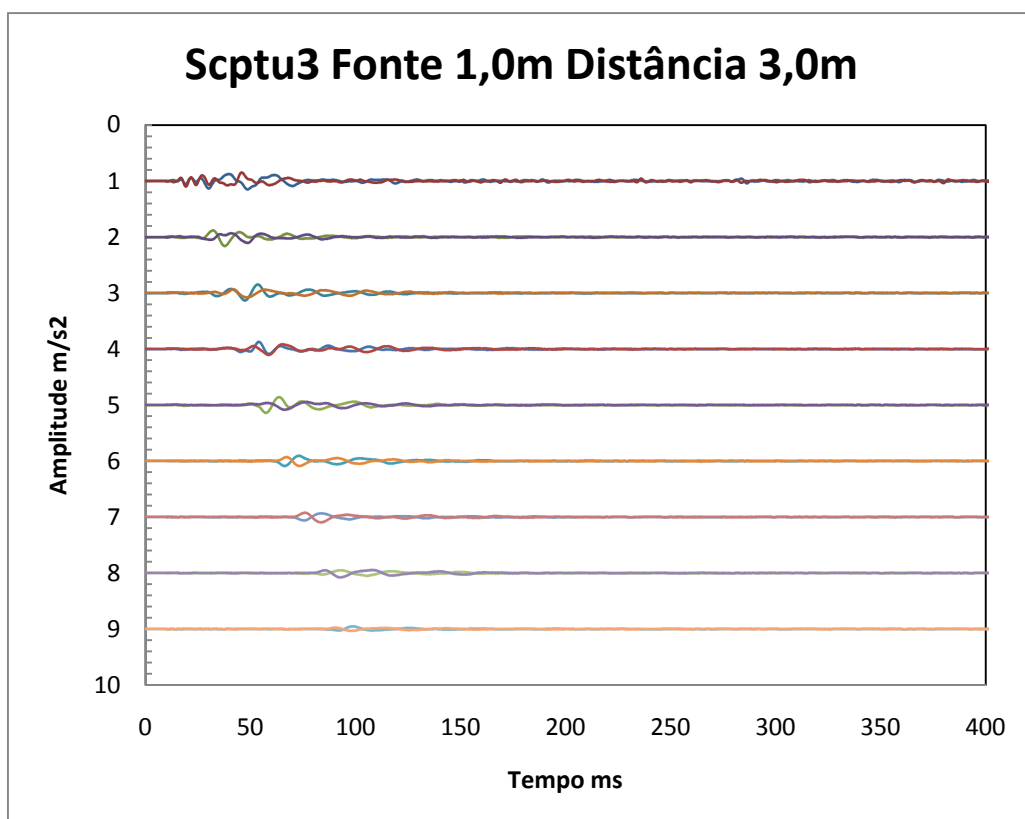


Figura 52 – Avaliação de amplitude da onda para a fonte de 1,0m a 3,0m de distância

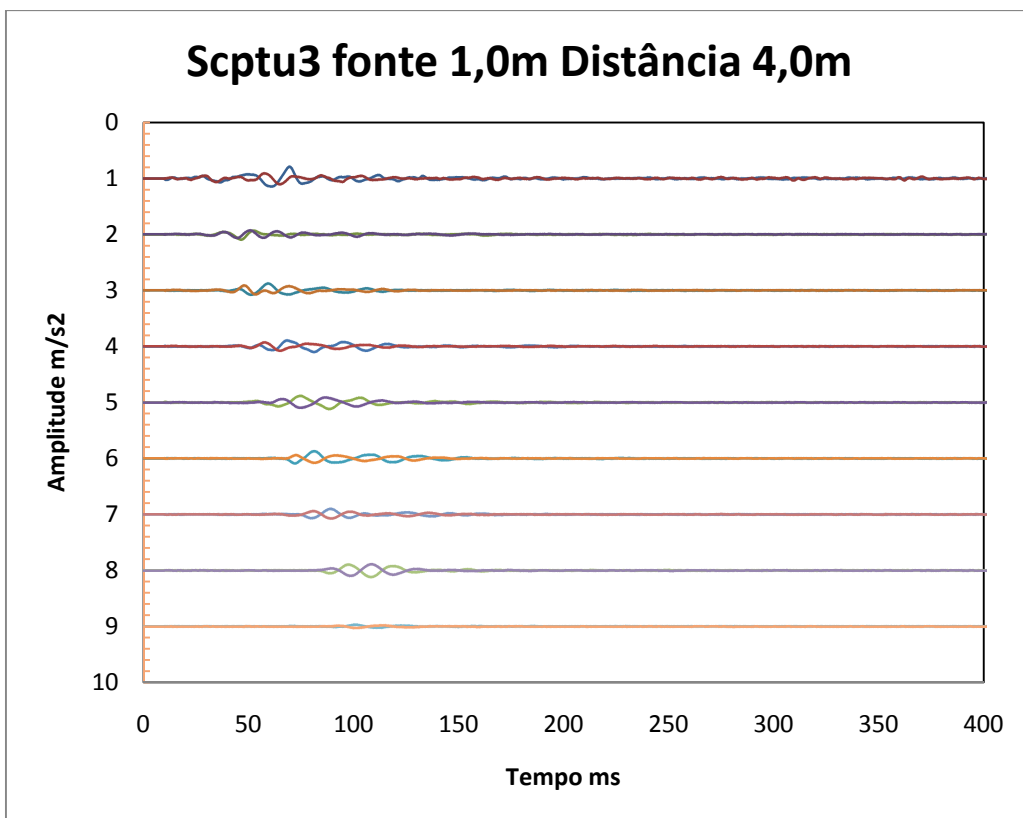


Figura 53 – Avaliação de amplitude da onda para a fonte de 1,0m a 4,0m de distância

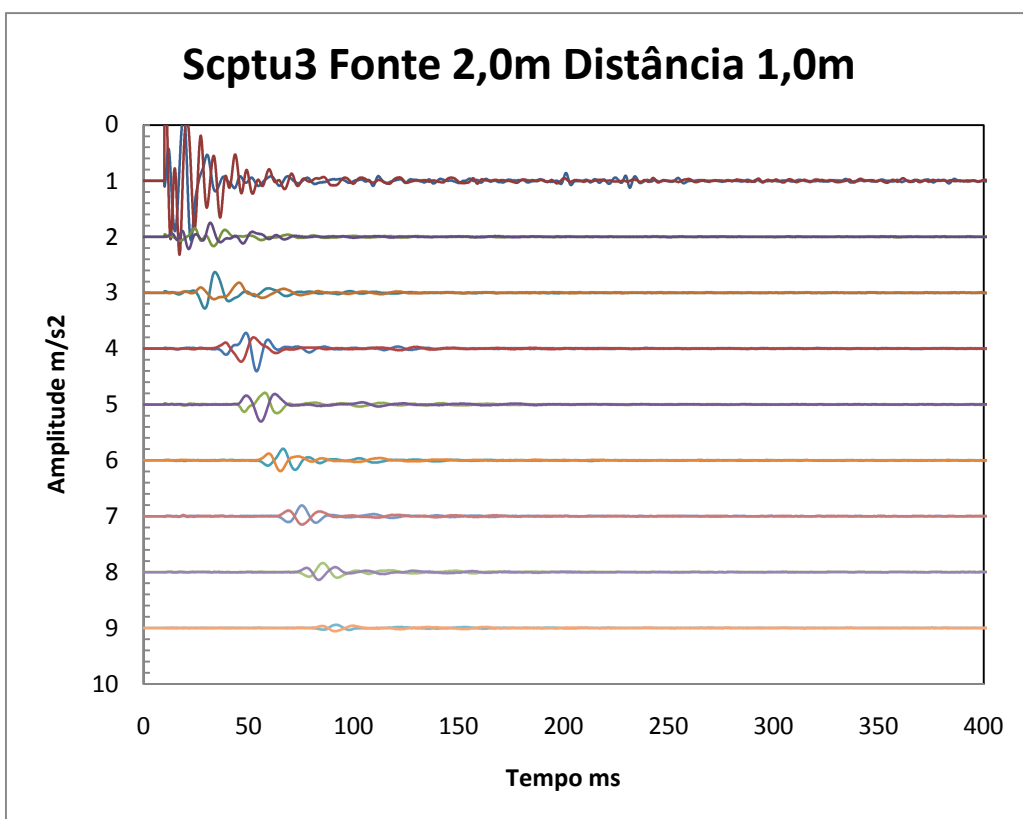


Figura 54 - Avaliação de amplitude da onda para a fonte de 2,0m a 1,0m de distância

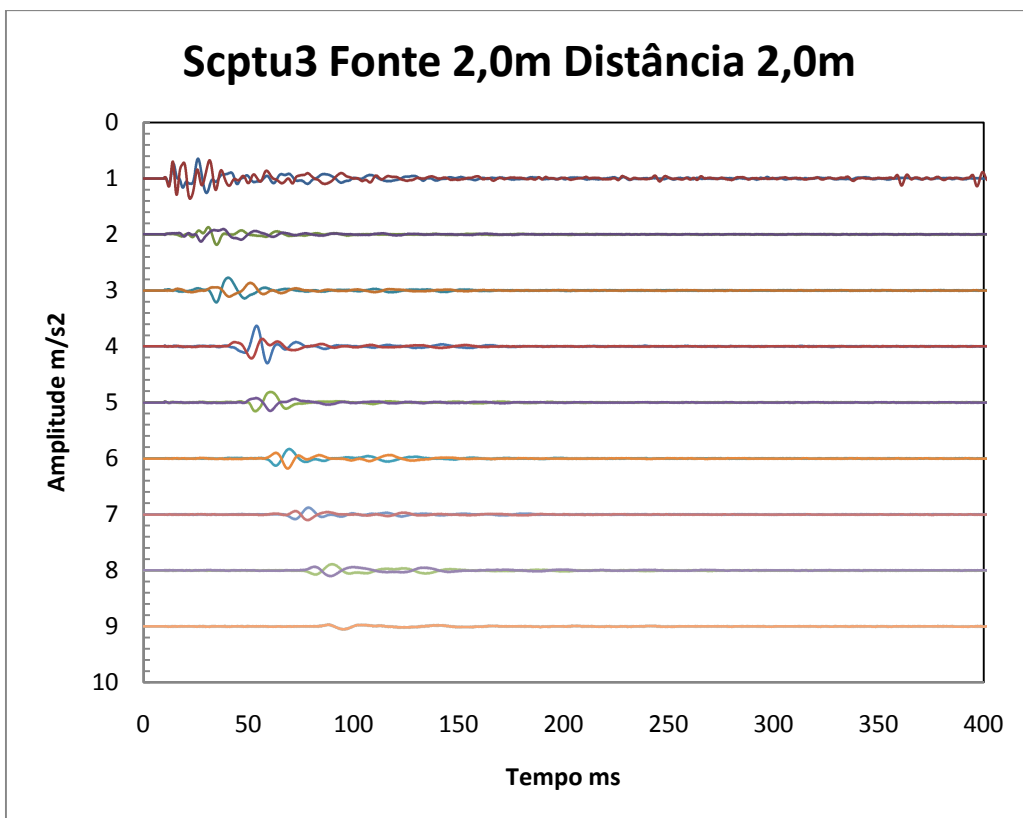


Figura 55 - Avaliação de amplitude da onda para a fonte de 2,0m a 2,0m de distância

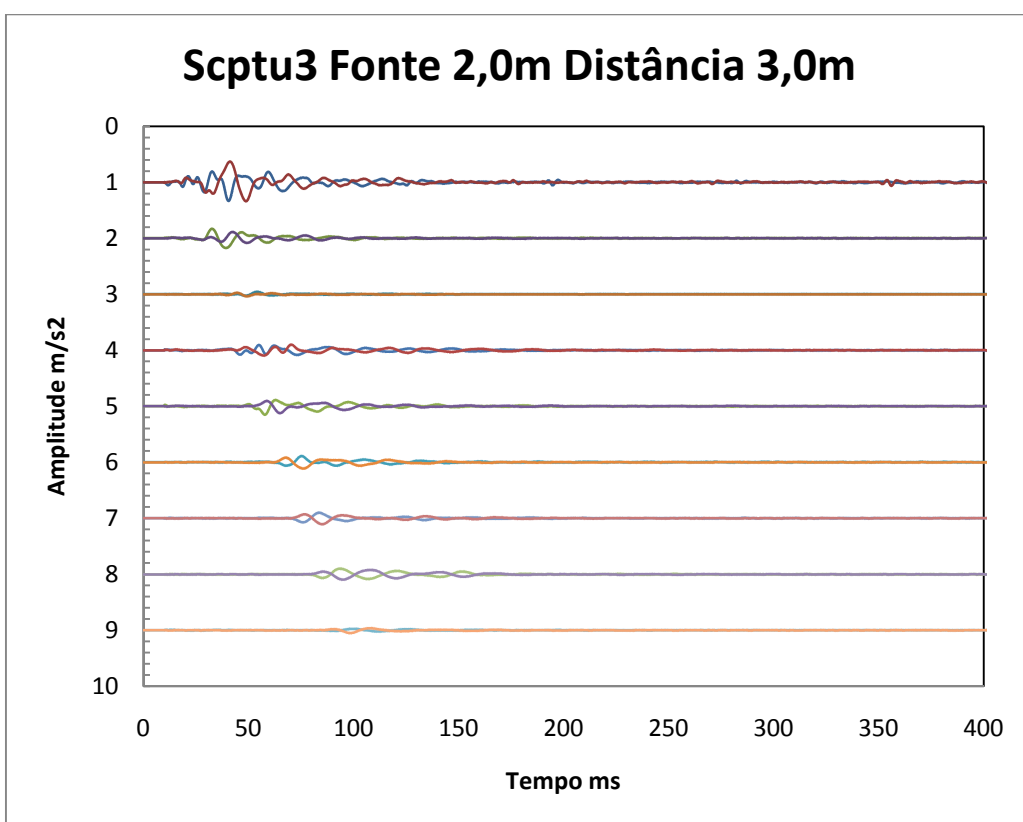


Figura 56 - Avaliação de amplitude da onda para a fonte de 2,0m a 3,0m de distância

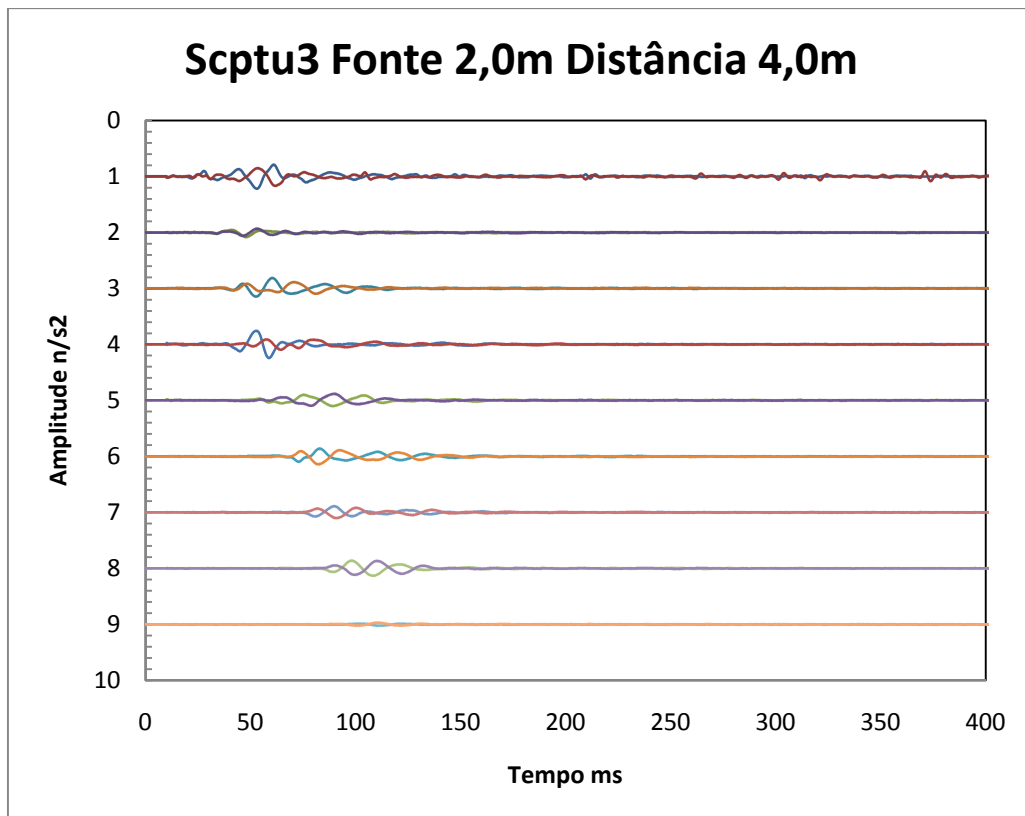


Figura 57 - Avaliação de amplitude da onda para a fonte de 2,0m a 4,0m de distância

Como já tinha sido verificado no ensaio anterior, a fonte de menores dimensões às maiores profundidades, gera uma amplitude de onda menor do que na fonte de maiores dimensões. Também aqui, se conseguiu verificar novamente esse fenómeno que já tinha sido observado.

Como este fenómeno pode ser observado, mas não é perceptível visualmente nos gráficos, quando são comparados em profundidade, decidiu-se efectuar uma análise individual à amplitude de onda sísmica a determinada profundidade para cada fonte e sua respectiva polarização às diversas distâncias (figura 58 a 61).

Deste modo, foi possível comparar as ondas polarizadas, a todas as distâncias e distinguir entre si a sua amplitude de onda.

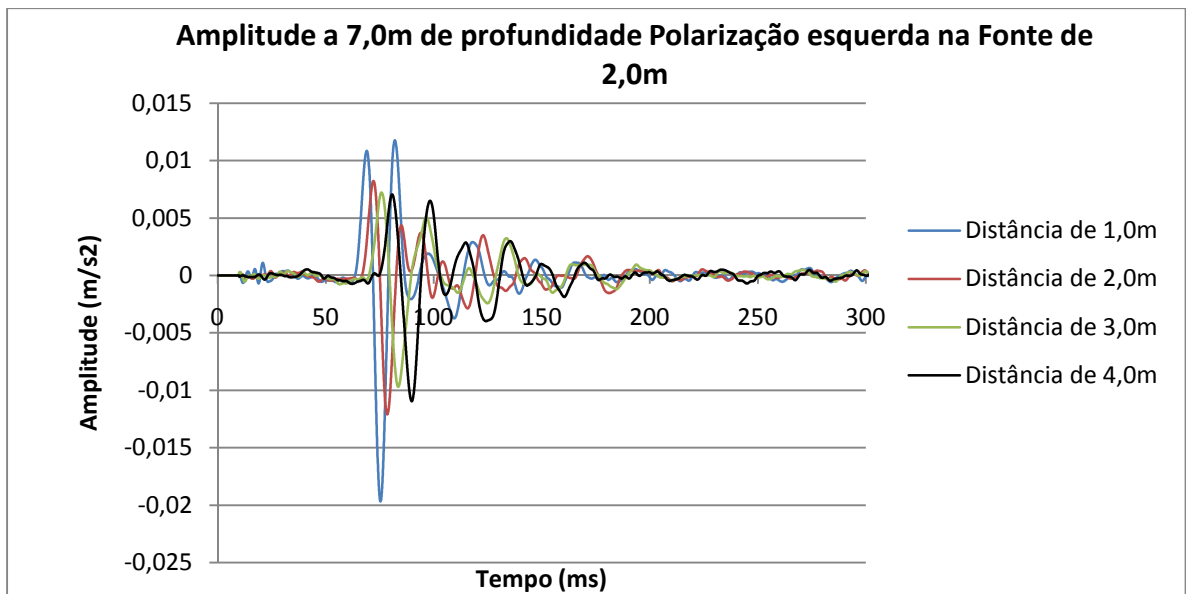


Figura 58 - Avaliação da amplitude de onda a 7,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

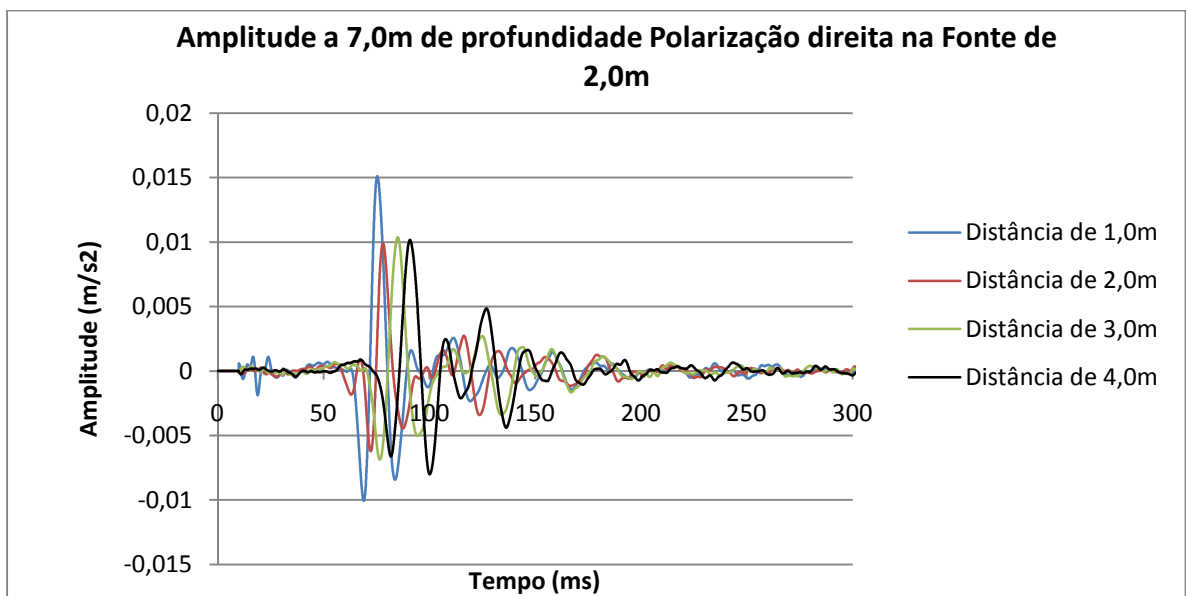


Figura 59 - Avaliação da amplitude de onda a 7,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

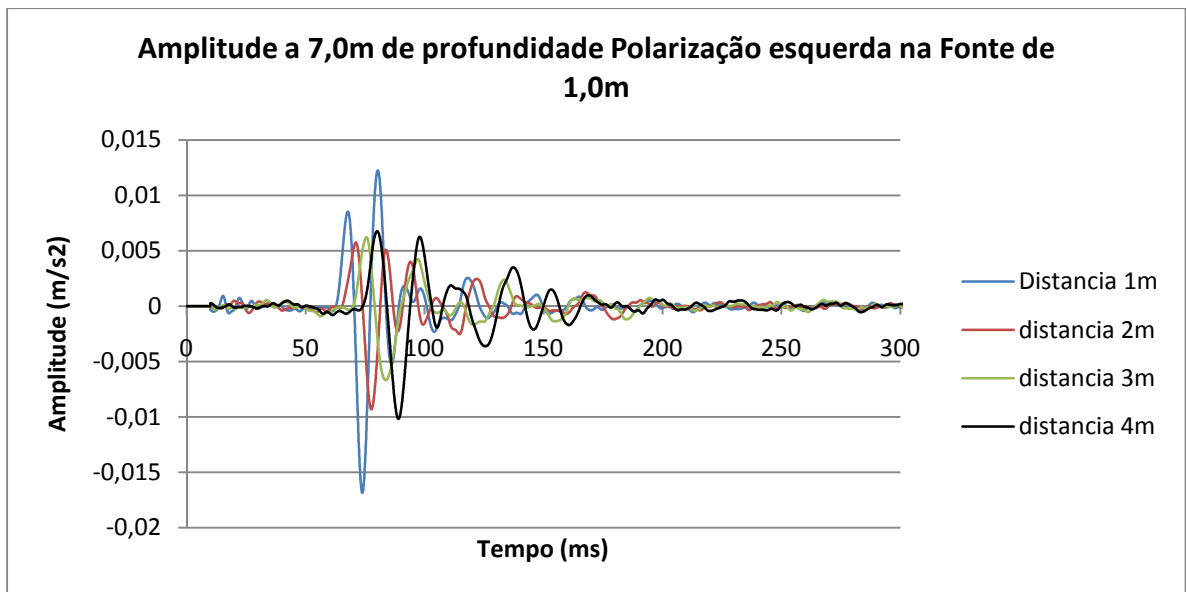


Figura 60 - Avaliação da amplitude de onda a 7,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

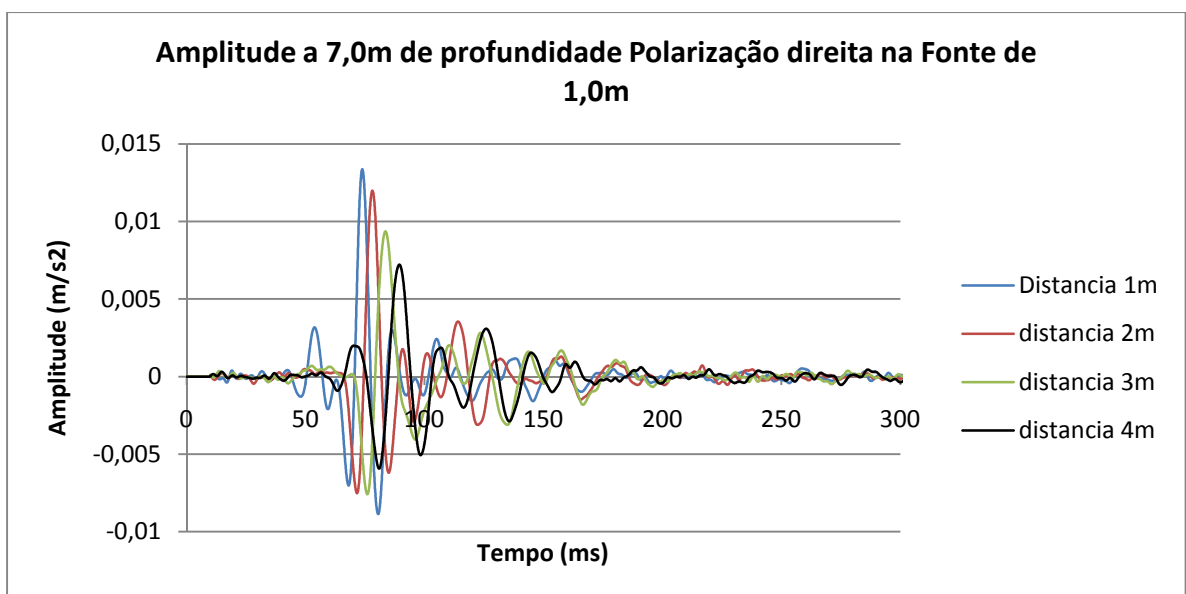


Figura 61 - Avaliação da amplitude de onda a 7,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

Daqui podemos concluir que a respectiva amplitude de onda a uma distância de 1,0m, é maior que as restantes, embora em algumas profundidades se notem que as amplitudes tendam a diminuir. Os restantes gráficos que comprovam este fenómeno serão apresentados em Anexos.

Por último e visto que dos resultados obtidos para a velocidade da onda de corte, para qualquer fonte e a qualquer distância, dependiam do seu coeficiente de relação R^2 , esse factor tinha de ser levado em consideração.

O coeficiente de correlação foi avaliado em profundidade relativamente ao seu afastamento (figura 62).

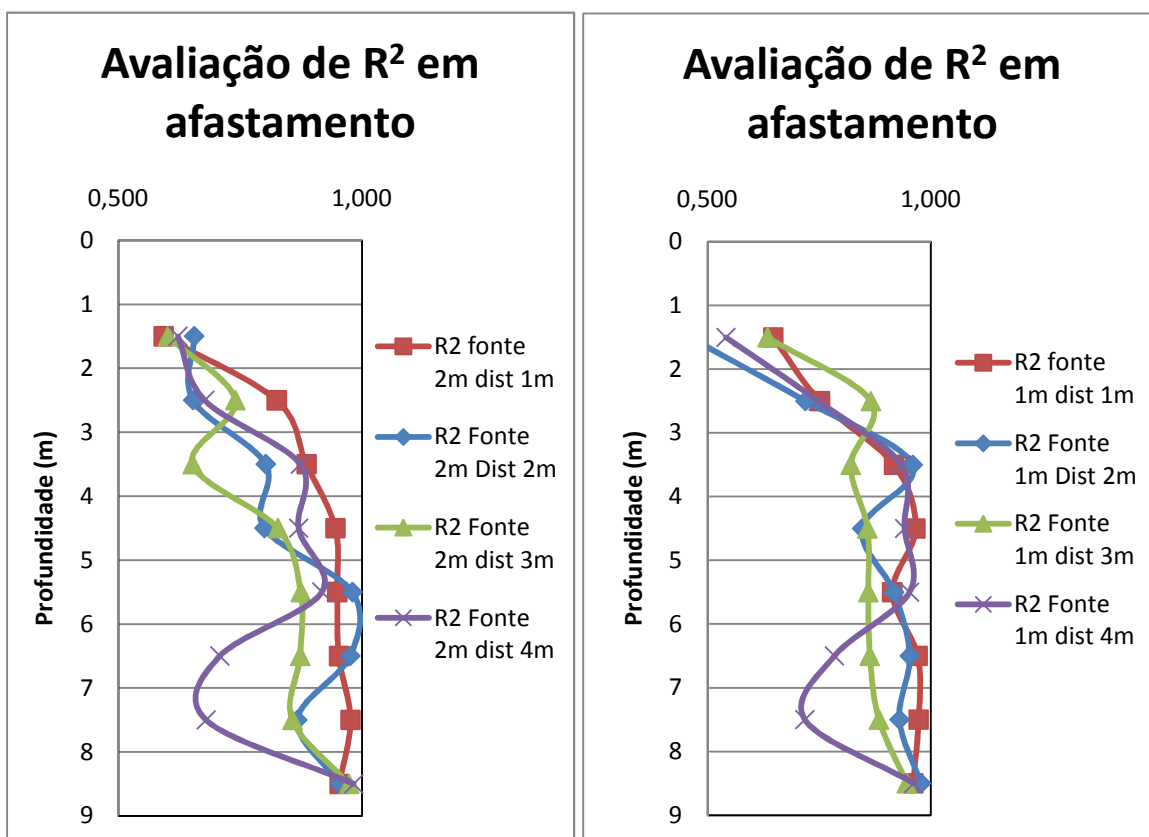


Figura 62 - Evolução dos coeficientes de correlação quanto ao afastamento pelo método da correlação cruzada

Nestes gráficos, podemos observar que na generalidade o coeficiente de correlação diminui quanto maior for afastamento para qualquer que seja a profundidade considerada. É possível verificar que no maior afastamento da fonte ao ponto de cravação, quando comparado com os outros valores, eles não sofrem um afastamento linear. Entre os 6,0m e os 8,0m o coeficiente em ambas as fontes, diminui drasticamente em relação aos restantes afastamentos (1,0m, 2,0m e 3,0m).

Face a todos os resultados obtidos, optou-se por utilizar as velocidades relativas à fonte de 2,0m afastada de 2,0m, o que originou o de perfil de velocidades constante da figura 63.

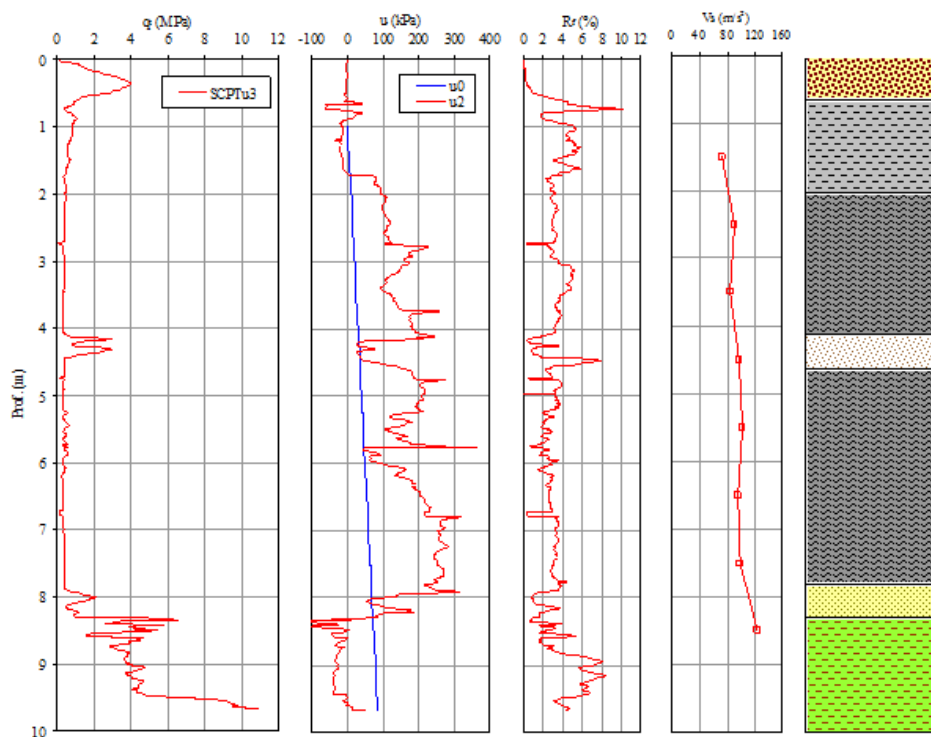


Figura 63 - Valores obtidos após tratamento das velocidades de corte do SPTu-3

7.1.2. Caracterização das formações atravessadas

Relativamente aos materiais atravessados por este ensaio, seguiu novamente a classificação de Robertson (1990), cuja representação se apresenta (figura 64):

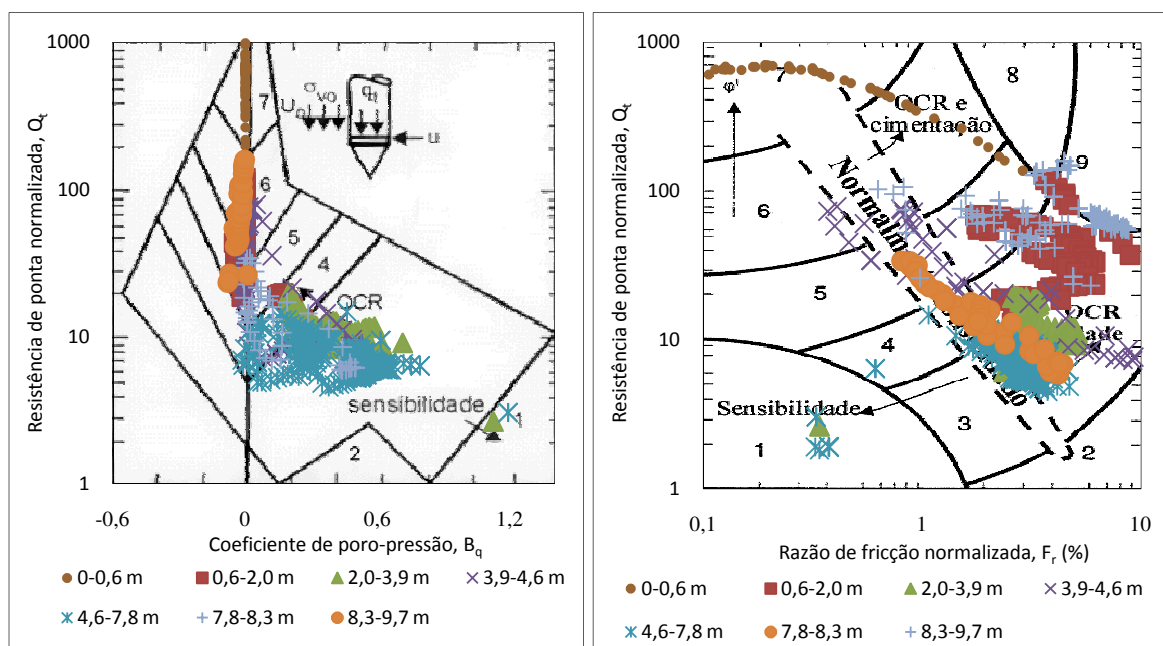


Figura 64 – Projecção dos dados do ensaio CPTu-3 sobre a carta de Robertson 90

Nestes dados representados graficamente sobre a carta de Robertson (1990), podemos verificar que no ensaio atravessamos à superfície uma pequena camada com aproximadamente 0,6m de espessura de areias a areias com cascalho. Segue-se uma camada de 1,5m de siltes arenosos e depois uma intercalação de argilas e areias, tendo as camadas arenosas aproximadamente 2,0m de espessura e as areias cerca de 0,5m, até à profundidade de 8,0m. Estas repousam sobre uma camada de siltes areno-argilosos sobreconsolidados ou cimentados.

Na tabela seguinte (tabela 12), podem ser observados os parâmetros de caracterização geotécnica, que podem ser avaliados dos parâmetros retirados do ensaio SCPTu, assim como a apresentação gráfica (figura 65) do Módulo Distorcional referente ao ensaio SCPTu-3.

Tabela 12 - Parâmetros obtidos no ensaio SCPTu-3

Autor	Parâmetro		Valores obtidos						
			0,0-0,6m	0,6-2,0m	2,0-3,9m	3,9-4,6m	4,6-7,8m	7,8-8,3m	8,3-9,7m
Jamiolkowski <i>et al.</i> , (1985)	Dr	%	53	21	13	19	12	18	40
de Mello	ϕ'	°	37	29	-	29	-	29	33
Clausen Denver	ϕ'	°	54	34	-	30	-	28	38
Robertson Campanella	ϕ'	°	48	35	-	30	-	28	39
Kulhawy Mayne	ϕ'	°	40	31	-	29	-	29	37
Baldi e tal (1989)	E's	Mpa	7	4	3	6	4	6	17
Vesic (1970)	M	Mpa	6	1	1	2	1	2	11
Powel e Quaterman (1988)	Cu	Kpa	-	-	32	-	30	-	-

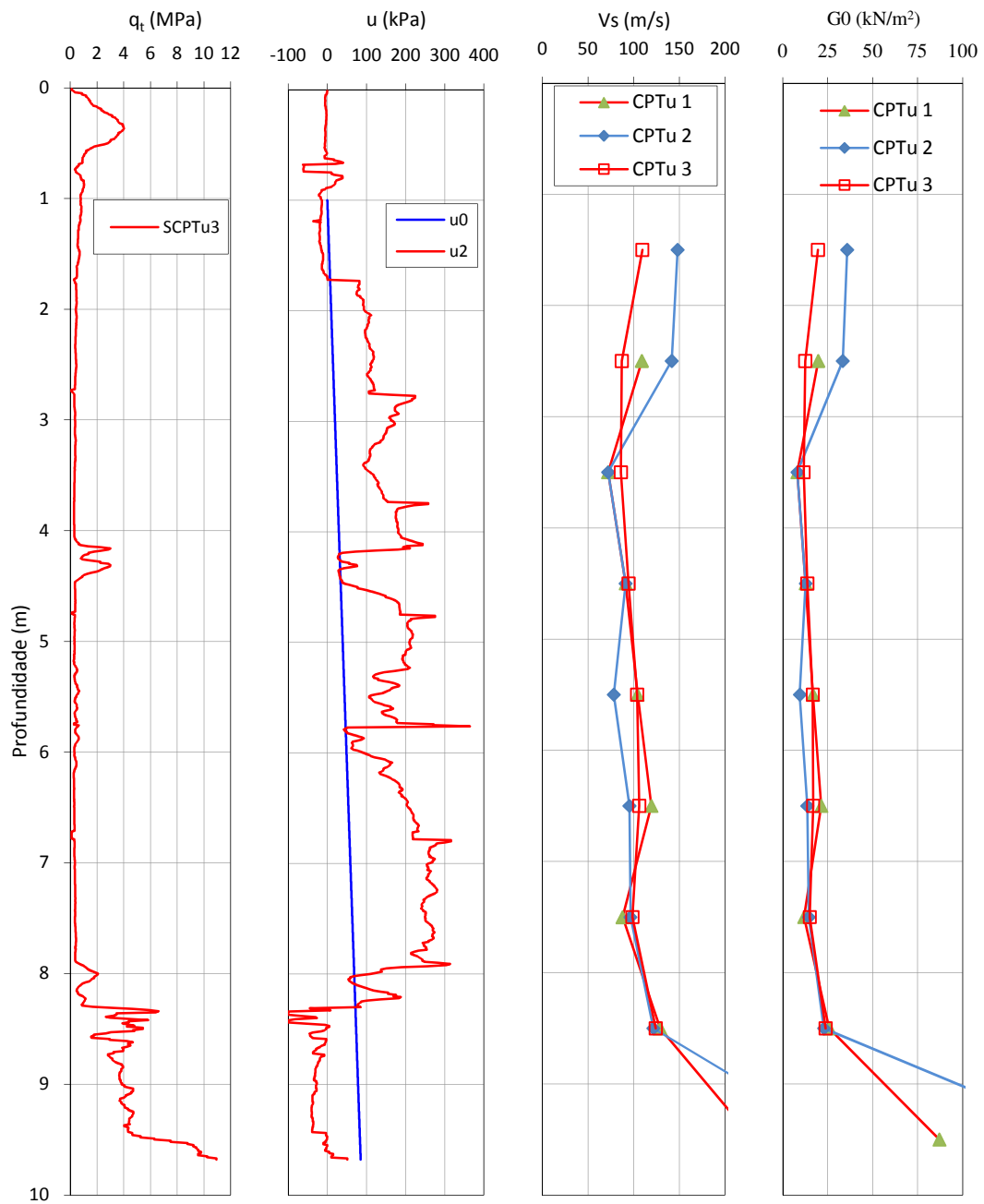


Figura 65 - Valores obtidos após tratamento das velocidades de corte do SCPTu-3, para a fonte de 2,0m

Da análise aos resultados obtidos, pode ser observado que os valores das velocidades das ondas de corte obtidos, em comparação com os registados anteriormente (figura 65), as velocidades para a mesma fonte e o mesmo afastamento, apresentam valores das velocidades da mesma ordem de grandeza.

8. CONCLUSÕES

8. CONCLUSÕES

Conforme se tentou demonstrar, relativamente à nova metodologia de execução do ensaio SCPTu, a análise dos dados obtidos aquando da execução do ensaio CPT (resistência de ponta, razão de atrito e registo de poro-pressão) traz vantagens, relativamente à escolha de possíveis pontos onde possam existir dúvidas.

Com o incremento do método de classificação visual, proposta por Saraiva Cruz (2008), um método expedito e prático de análise às formações atravessadas, uma pré-análise que indicará se existirá algum ponto onde terá interesse de caracterizar com mais pormenor, o que nesta metodologia se torna uma mais valia.

Como pode ser observado através da análise dos gráficos obtidos da poro-pressão registada nos ensaios realizados, o registo da poro-pressão traçado, efectua uma dissipação nesse registo, o que implica directamente a erros associados ao registo da resistência de ponta corrigida. Este valor da poro-pressão, conforme pode ser verificado entra directamente para o seu cálculo, influenciando desta maneira o valor final.

Esta nova metodologia, em campo, evidenciou-se mais rápida que o método tradicional.

O uso de uma só fonte, tornou por si só o sistema, mais rápido e cómodo de executar, do que as duas fontes metálicas que usualmente são usadas, que têm de ser posicionadas à mesma distância do ponto de cravação.

Relativamente ao efeito do afastamento da fonte sísmica ao ponto de execução do ensaio SCPTu, os dados obtidos, relativos ao coeficiente de relação gerado pelo método da correlação cruzada evidenciam tendência para uma diminuição à medida aumenta a distância da fonte ao ponto de ensaio, ou seja, com o afastamento da fonte a fiabilidade na avaliação da velocidade da onda de corte diminui, o que indica um aumento no erro gerado.

De um outro ponto de vista diferente, com o afastamento da fonte, podemos estar a recolher dados de velocidades, diferentes e onde o erro estará também majorado. No caso de estruturas não planares, com o incremento da distância, podem-se observar registos de litologias diferentes.

Na análise das amplitudes, podemos verificar que nas menores profundidades, no caso da fonte de maior comprimento a avaliação da velocidade da onda de corte torna-se complicada,

provavelmente devido ao ruído existente. Este fenómeno não acontece tão vincadamente na fonte menor comprimento, exceptuando quando a mesma se situa a 1,0m do ponto de cravação.

Este fenómeno leva-nos a crer que com as fontes de menores dimensões, obtêm-se melhores amplitudes a curtas profundidades, enquanto que quando descemos na litologia, a fonte de menor dimensão, não consegue gerar tanta energia, ou energia suficiente para que se verifiquem ondas de maior amplitude, de tal modo a que a onda ao ser “picada” não existam duvidas.

O trabalho desenvolvido mostrou claramente que a utilização da metodologia de ensaio SCPTu que diz respeito a uma primeira fase de execução completa do ensaio CPTu e uma segunda, relativa à aquisição dos sinais sísmicos na fase ascendente torna-se mais vantajosa, porque envolve menos tempo de execução do ensaio e para além disso, o conhecimento prévio do perfil traçado do terreno permite-nos escolher previamente os pontos onde deverá ser avaliada a velocidade das ondas de corte.

Da análise dos dados apresentados, concluiu-se que nas condições de ensaio existente neste ambiente geológico, a fonte que apresentou melhores resultados foi efectivamente a fonte de 2,0m com um afastamento de 2,0m ao ponto de cravação.

Para validar os resultados obtidos, seria importante a realização de ensaios do tipo Cross-Hole ou Up-Hole, de modo a comparar as velocidades obtidas nesses ensaios com as dos ensaios realizado neste trabalho.

Neste trabalho não foram tratados dados com fontes metálicas com as mesmas dimensões e afastamentos, penso que seria importante cruzar ondas de corte a curtas distâncias com fontes sísmicas da mesma dimensão mas de natureza diferente (metálica vs madeira) especialmente a curtas distâncias de modo a avaliar a influencia do ruído no sinal sísmico em ambas as fontes.

9. BIBLIOGRAFIA

- Cruz J., 2008. Caracterização geotécnica de maciços terrosos com base em campanhas multi-ensaio – Caso CPT e DMT (em campanhas tradicionais). Instituto Superior de Engenharia do Porto. 202pp. (Tese de Mestrado).
- Rodrigues C., 2010. Metodologia alternativa de execução dos ensaios SCPTu com selecção da fonte sísmica e condições de ensaio. In: Actas do 12º Congresso Nacional Geotecnia. Sociedade Portuguesa de Geotecnia
- Cruz N., 2010. Modelling Geomechanics of Residual Soils With DMT Tests. Faculdade de Engenharia do Porto. 471pp. (Tese de Doutoramento).
- Baldi, G.; Bellotti, R.; Ghionna, V.N.; Jamiolkowski, M.; Lo Presti, D.F.C. (1989). “Modulus of sands from CPT’s and DMT’s” Proc. 12th ICSMFE, Rio de Janeiro, Vol. 1, pp. 165-170.
- CEN – prENV 1997-3 (1997). “Eurocode 7: Geotechnical design; part 3: Design assisted by field Testing”. European Committee for Standardization.
- ASTM D 5778-07 “Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils”
- Houlsby, G.T.; Teh, C.I. (1988). “Analysis of the piezocone in clay” Proc. Int. Symp. Penetrating Testing, ISOPT-1, Orlando, 2, pp. 777-783. Balkema Pub., Rotterdam.
- Jamiolkowski, M.; Ladd, C.C.; Germaine, J.T.; Lancellotta, R. (1985). “New developments in field and laboratory testing of soils” State-of-art report. Proc. 11th Int. Conf. ISSMFE, San Francisco, Vol. 1, pp. 57-153, Balkema Pub., Rotterdam.
- Kulhawy, F.H.; Mayne, P.W. (1990). “Manual of estimating soil properties for foundation design”. Geotech. Engng. Group, Cornell University, Ithaca.
- Lunne, T.; Robertson, P. K.; Powell, J. J. M. (1997). “Cone penetration test in geotechnical practice”. Blackie Academic & Professional, New York, USA, 312p..
- Robertson, P.K. (1990). “Soil classification using cone penetration test”. Canadian Geotech. J., Vol. 27, Nº 1, pp. 151-158.
- Robertson, P.K.; Campanella, R.G. (1983). “Interpretation of cone penetrometer test, Part I: Sand”. Canadian Geotech. J., Vol. 20, Nº 4, pp. 718-733.

- Senneset, K.; Janbu, N. (1984). "Shear strength parameters obtained from static cone penetration tests". Symposium Strength Testing Marine Sediments: Laboratory and In-situ Measurements, pp. 41-54 (ASTM 04-883 000-38), San Diego.
- Schnaid, F.; Houlsby, G.T. (1992). "Measurement of the properties of sand in a calibration chamber by the cone pressuremeter test". Géotechnique 42, N° 4, pp. 587-601.
- Tortensson, B.A. (1975). "Pore-pressure sounding instrument". Proc. ASCE Spec. Conf. on In Situ Measurement Properties, Raleigh, North Carolina, 2, pp. 48-54

ANEXOS

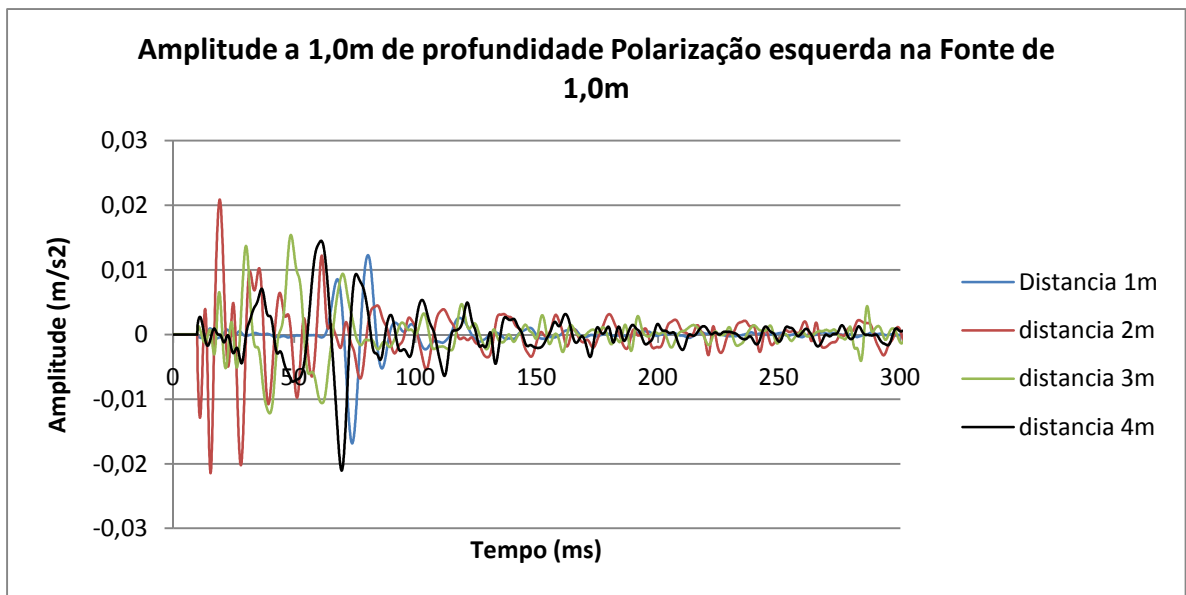


Figura 1 – Avaliação da amplitude de onda a 1,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

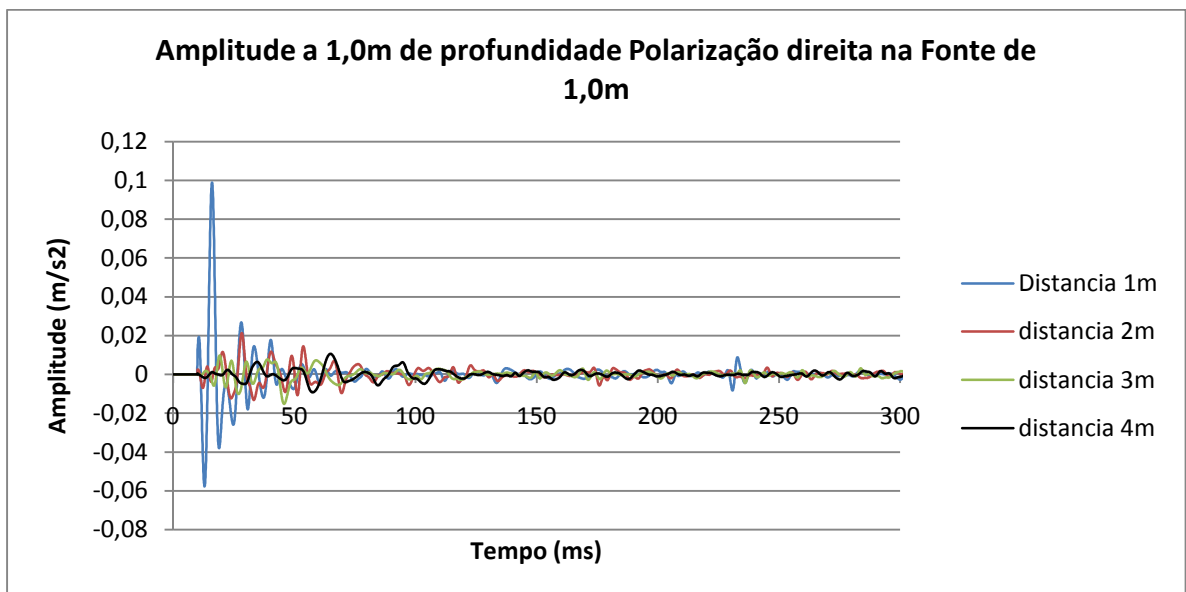


Figura 2 – Avaliação da amplitude de onda a 1,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

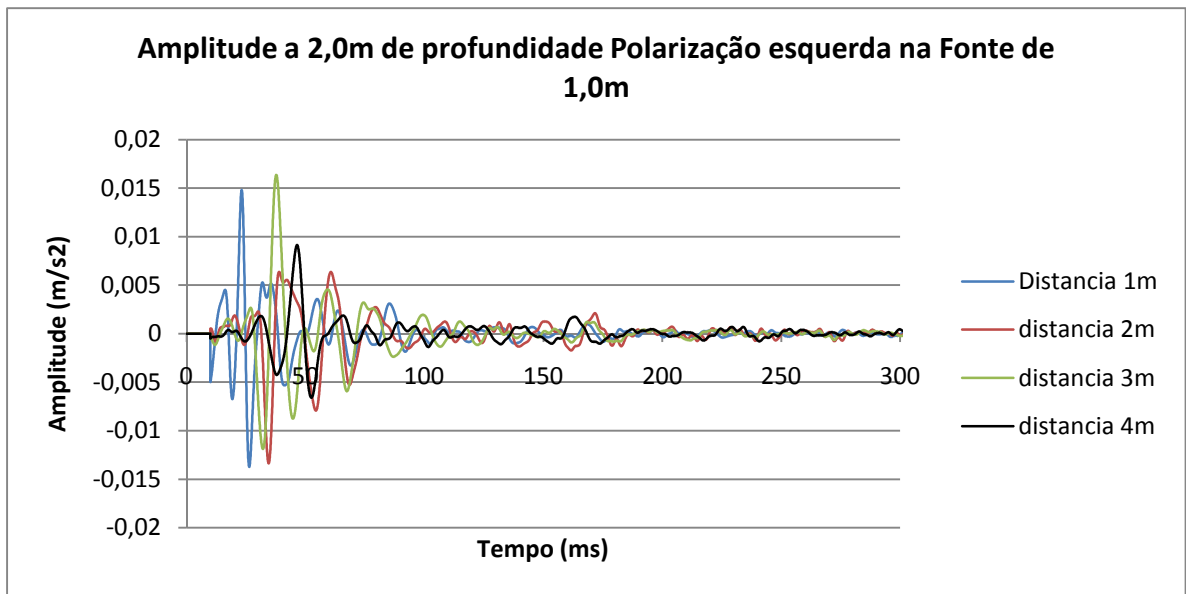


Figura 3 – Avaliação da amplitude de onda a 2,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

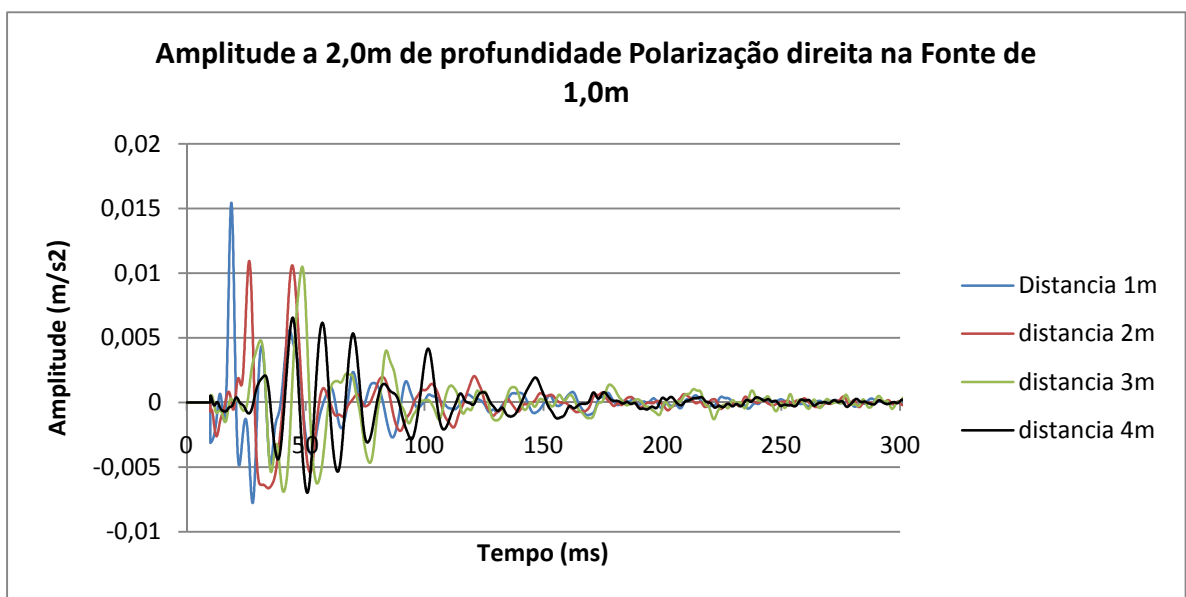


Figura 4 – Avaliação da amplitude de onda a 2,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

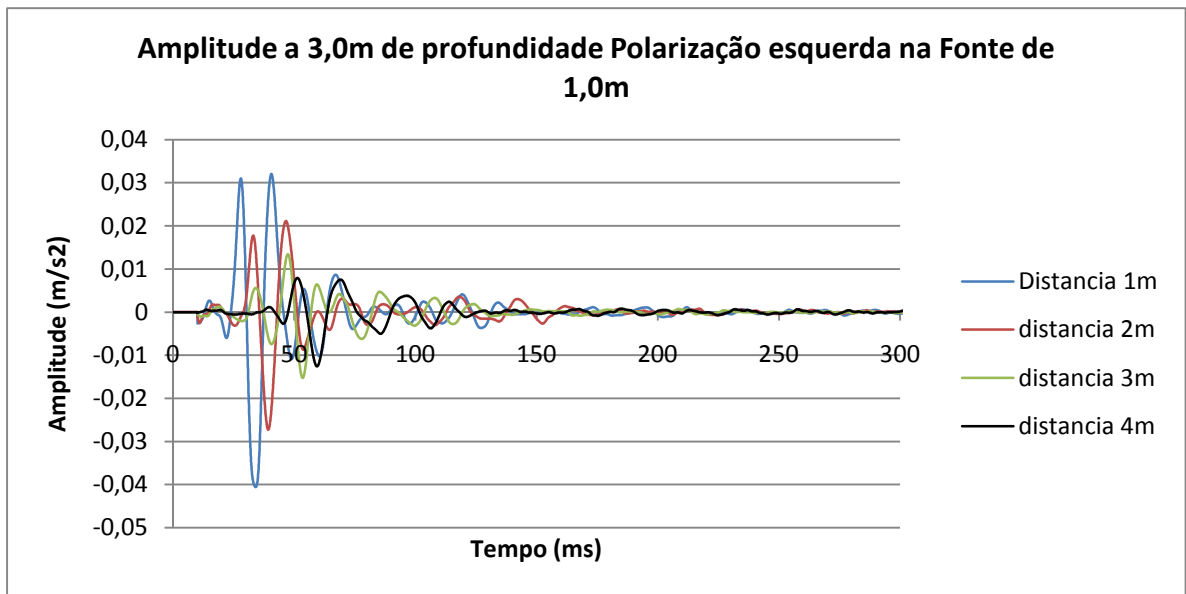


Figura 5 – Avaliação da amplitude de onda a 3,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

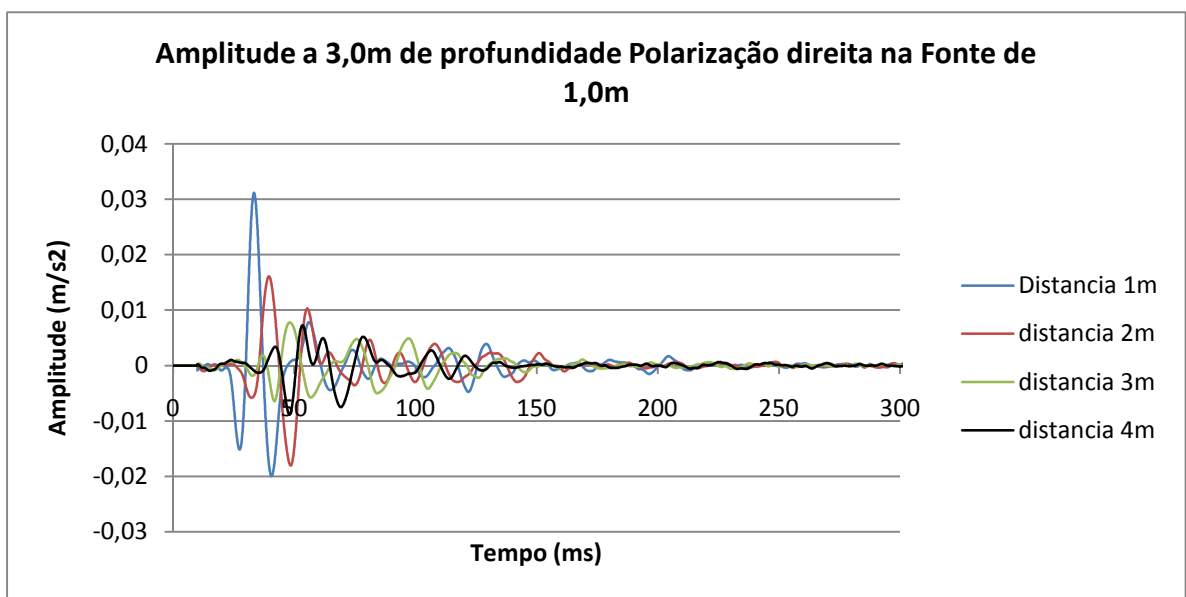


Figura 6 – Avaliação da amplitude de onda a 3,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

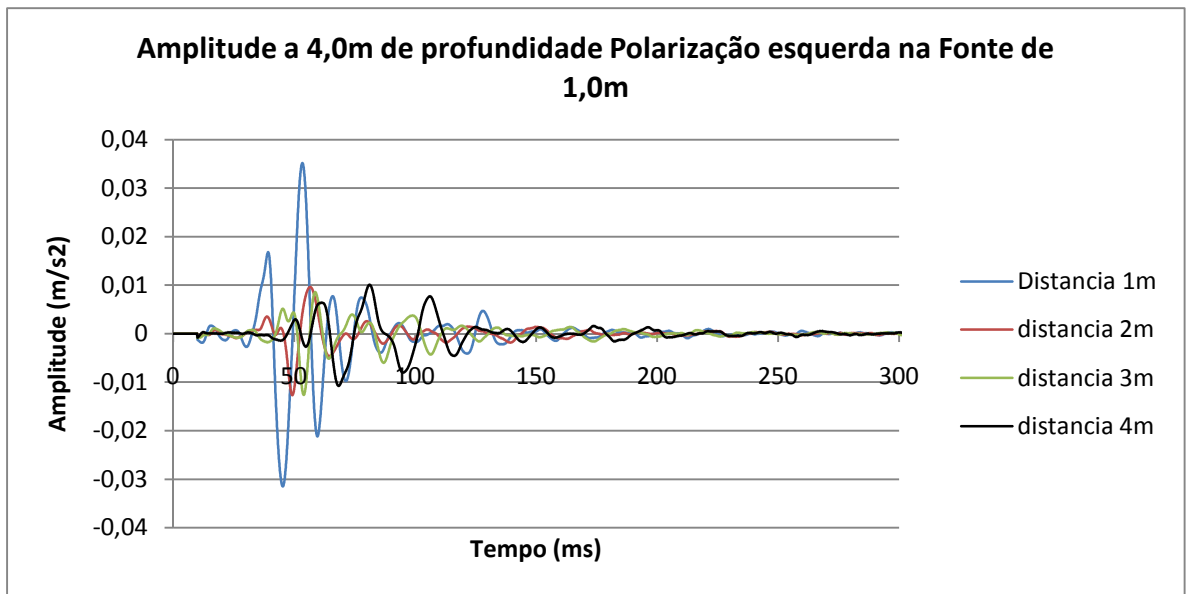


Figura 7 – Avaliação da amplitude de onda a 4,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

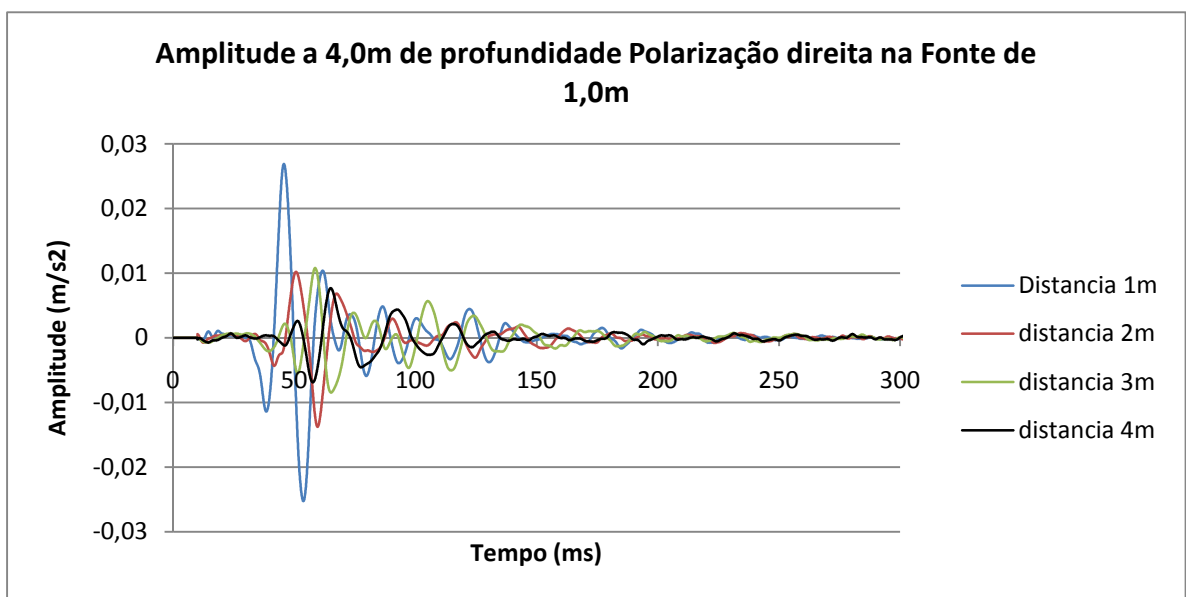


Figura 8 – Avaliação da amplitude de onda a 4,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

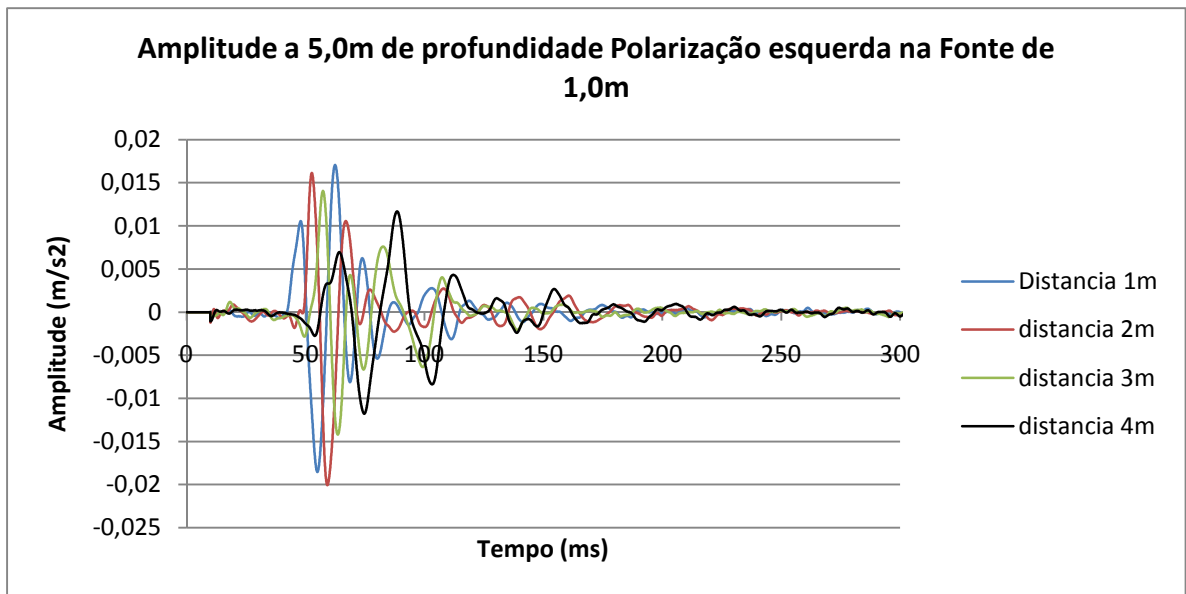


Figura 9 – Avaliação da amplitude de onda a 5,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

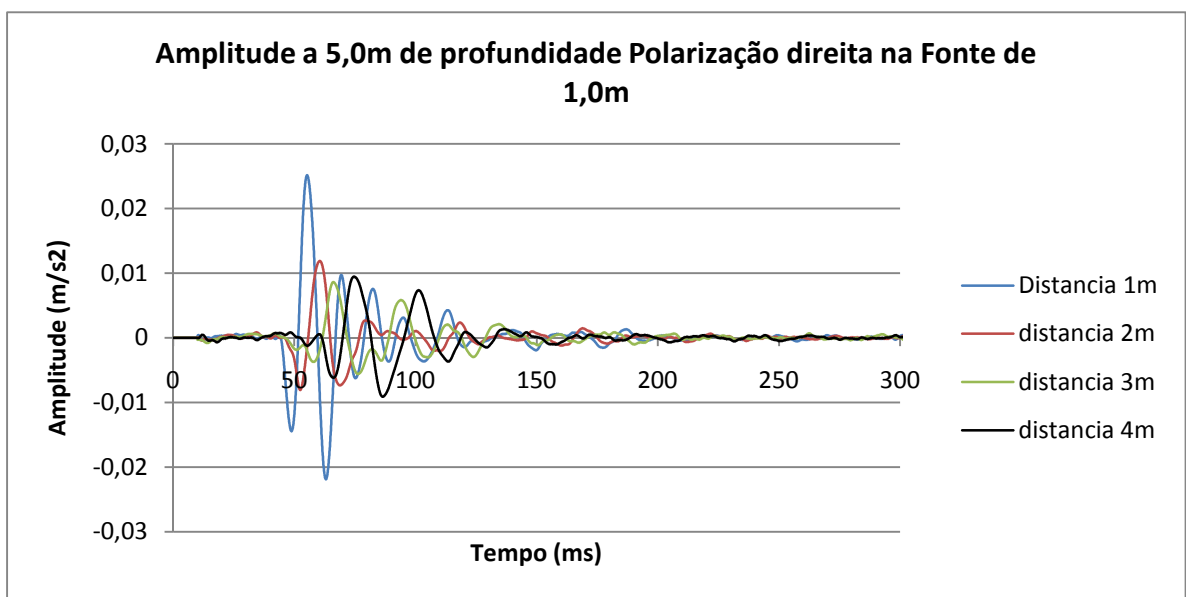


Figura 10 – Avaliação da amplitude de onda a 5,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

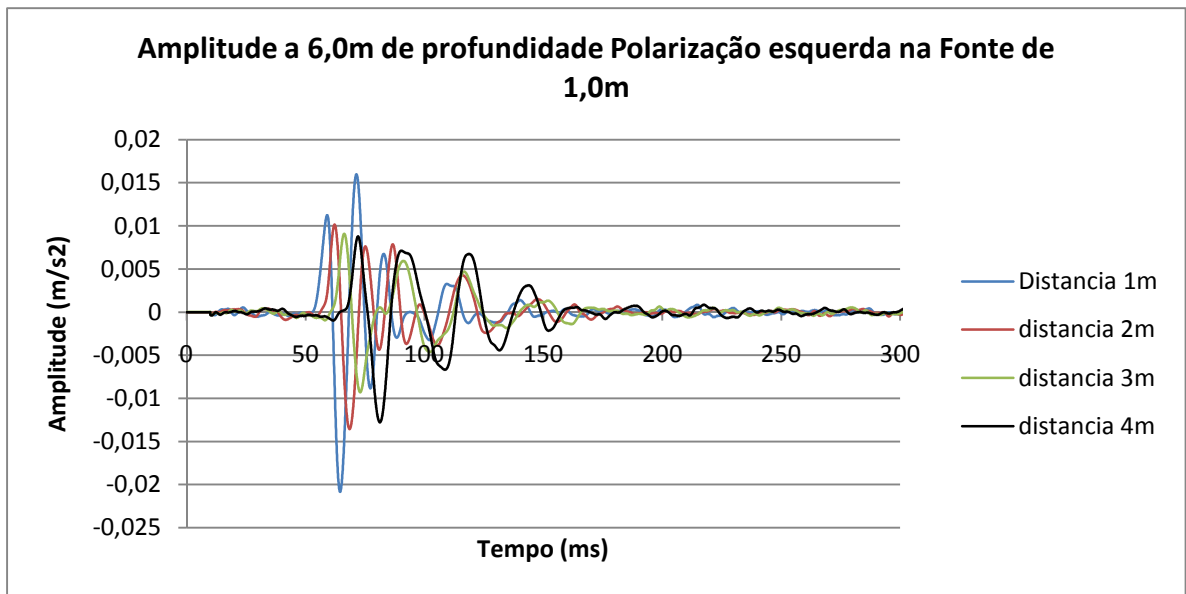


Figura 11 – Avaliação da amplitude de onda a 6,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

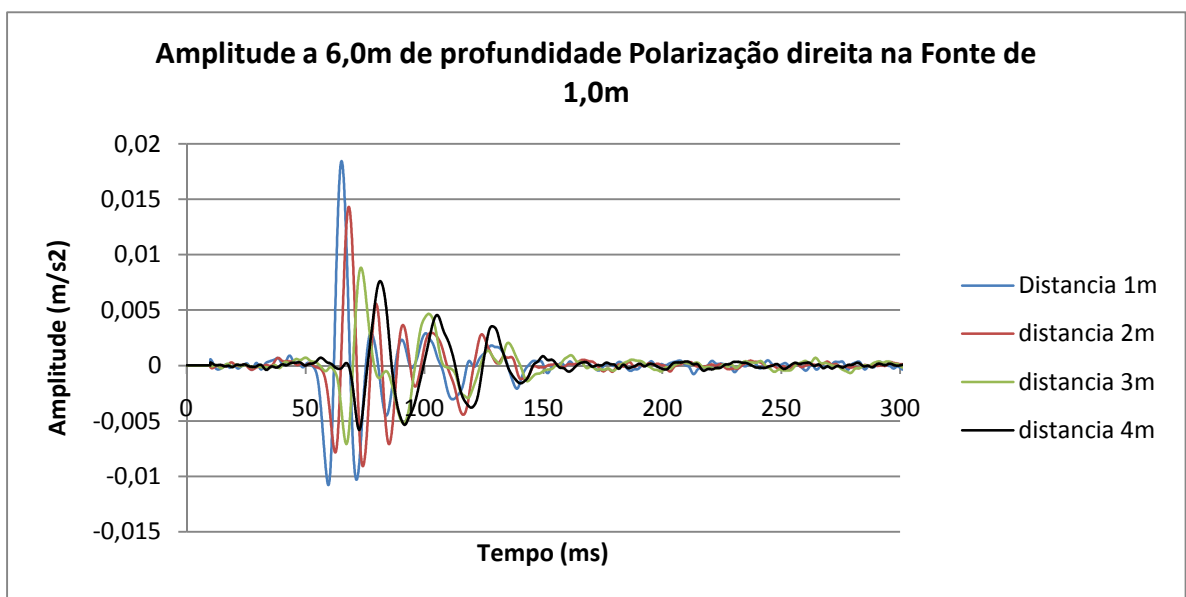


Figura 12 – Avaliação da amplitude de onda a 6,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

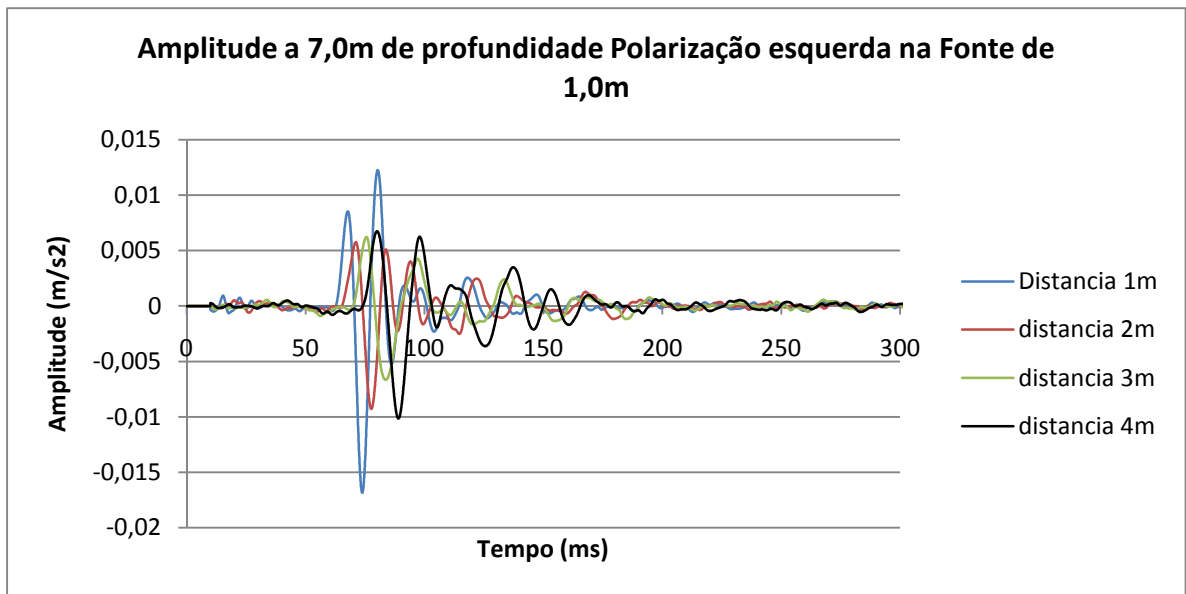


Figura 13 – Avaliação da amplitude de onda a 7,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

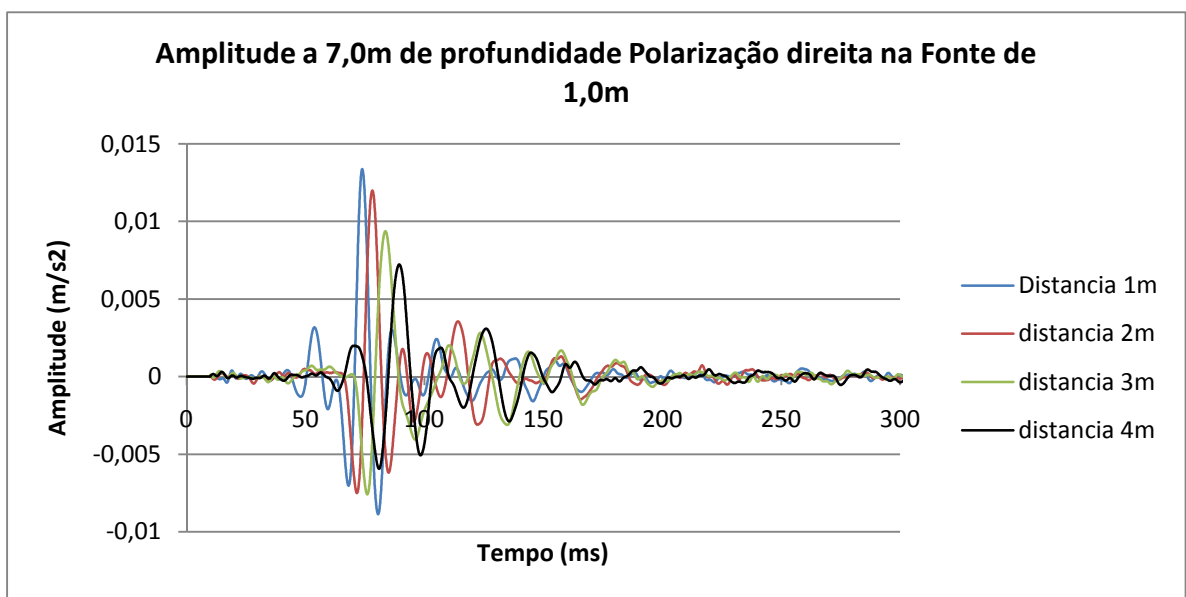


Figura 14 – Avaliação da amplitude de onda a 7,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

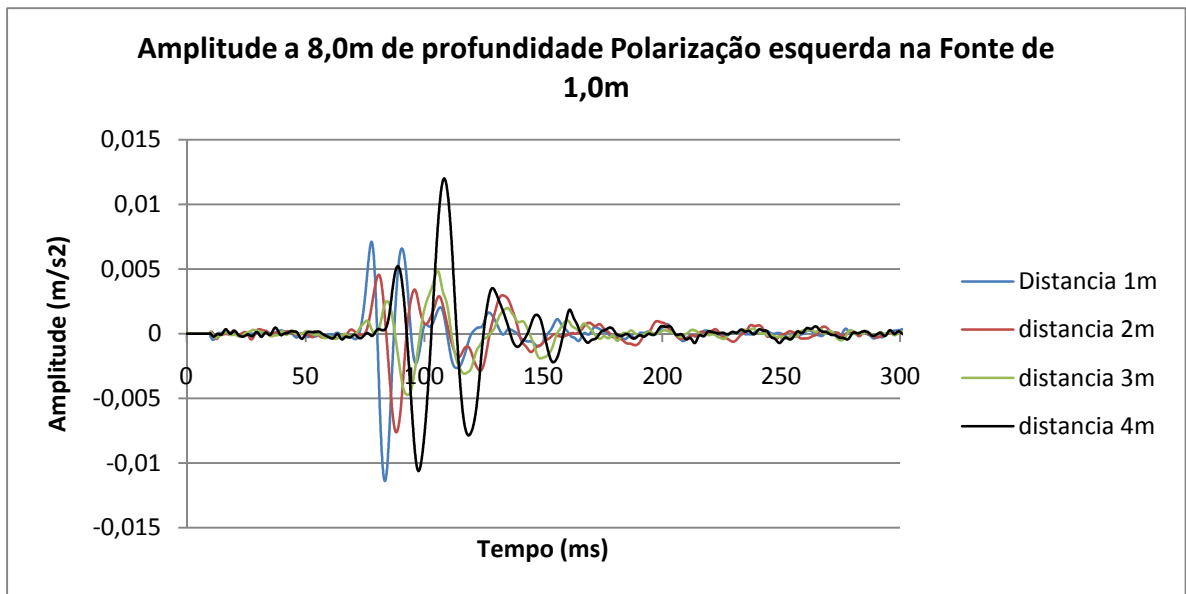


Figura 15 – Avaliação da amplitude de onda a 8,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

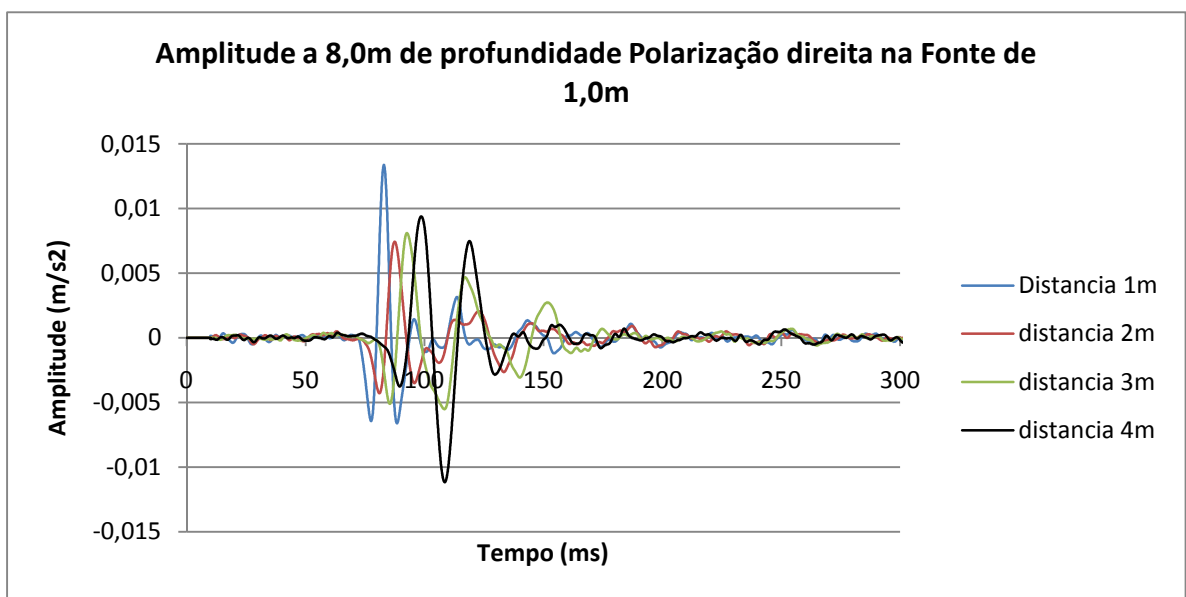


Figura 16 – Avaliação da amplitude de onda a 8,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

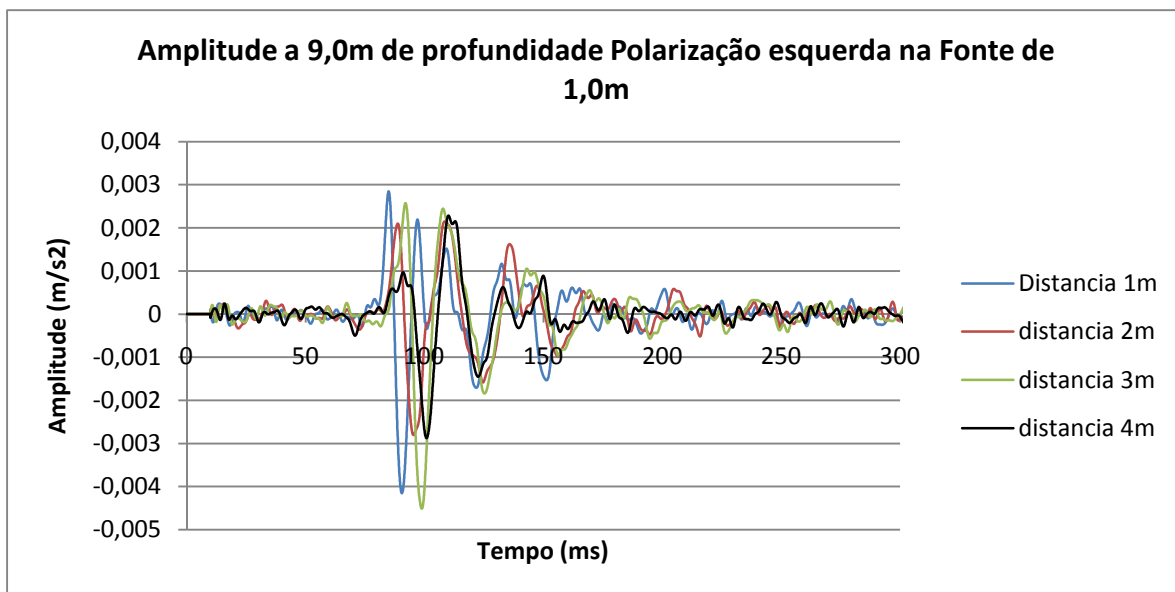


Figura 17 – Avaliação da amplitude de onda a 9,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

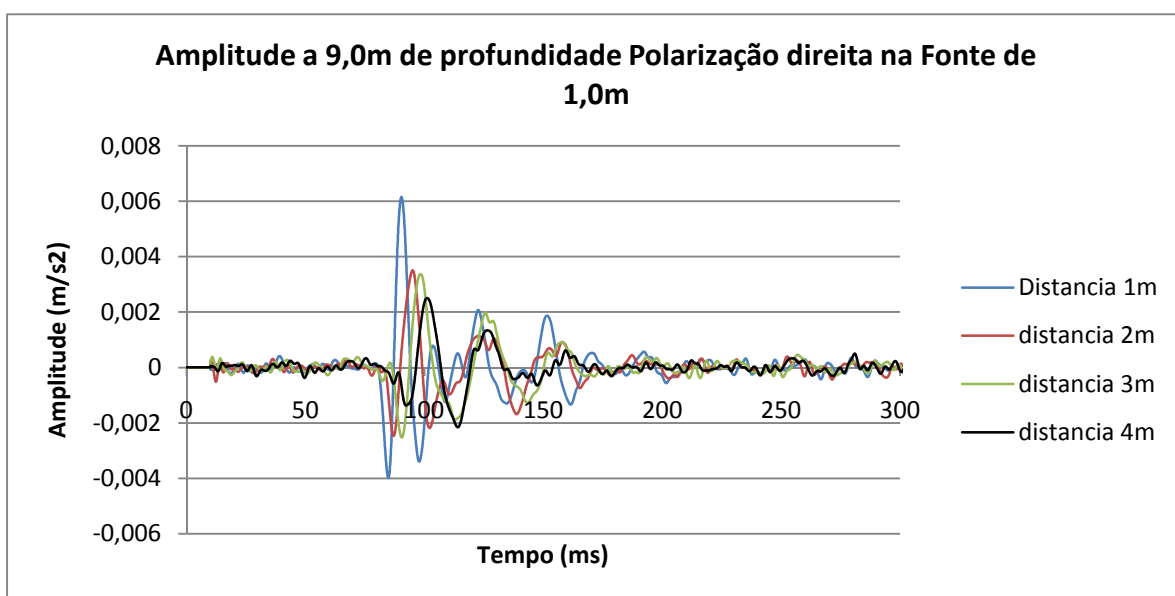


Figura 18 – Avaliação da amplitude de onda a 9,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

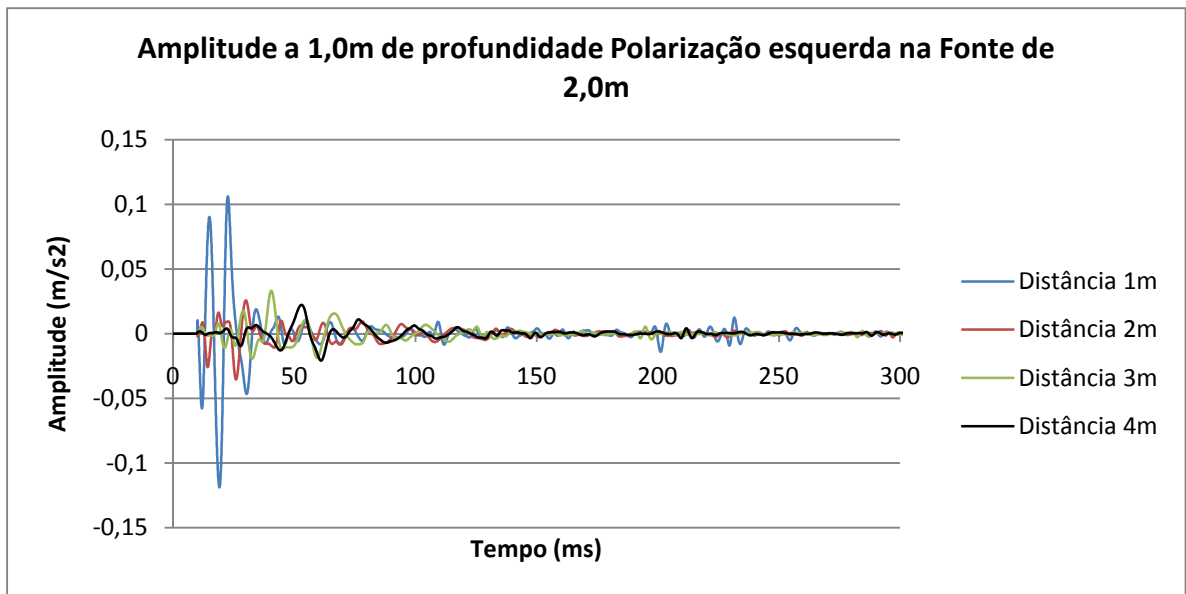


Figura 19 – Avaliação da amplitude de onda a 1,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

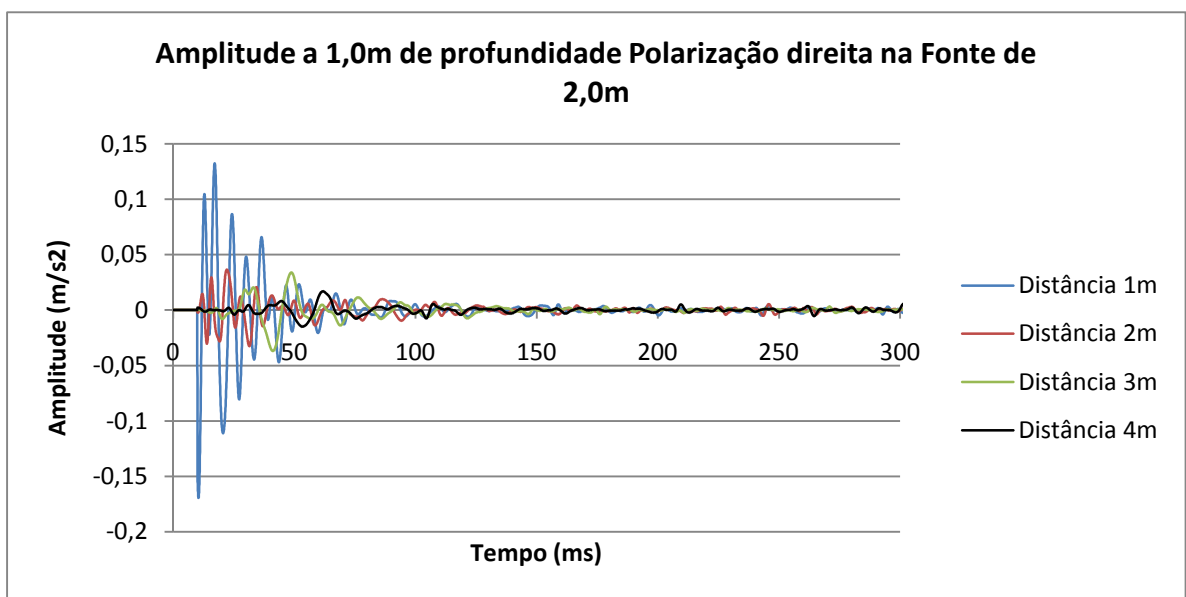


Figura 20 – Avaliação da amplitude de onda a 1,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

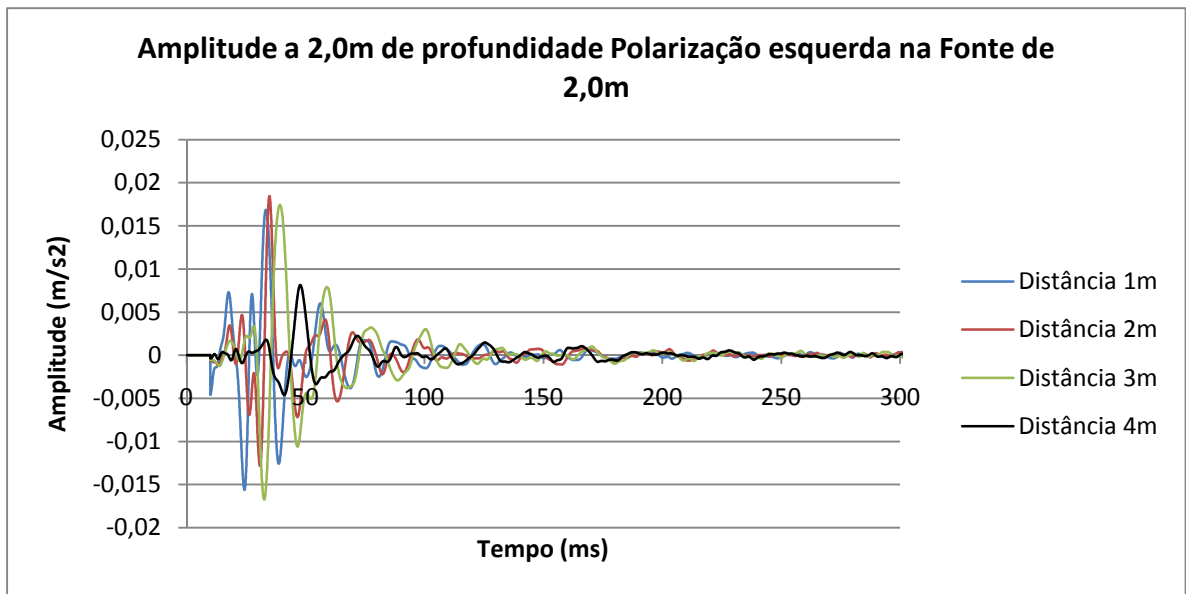


Figura 21 – Avaliação da amplitude de onda a 2,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

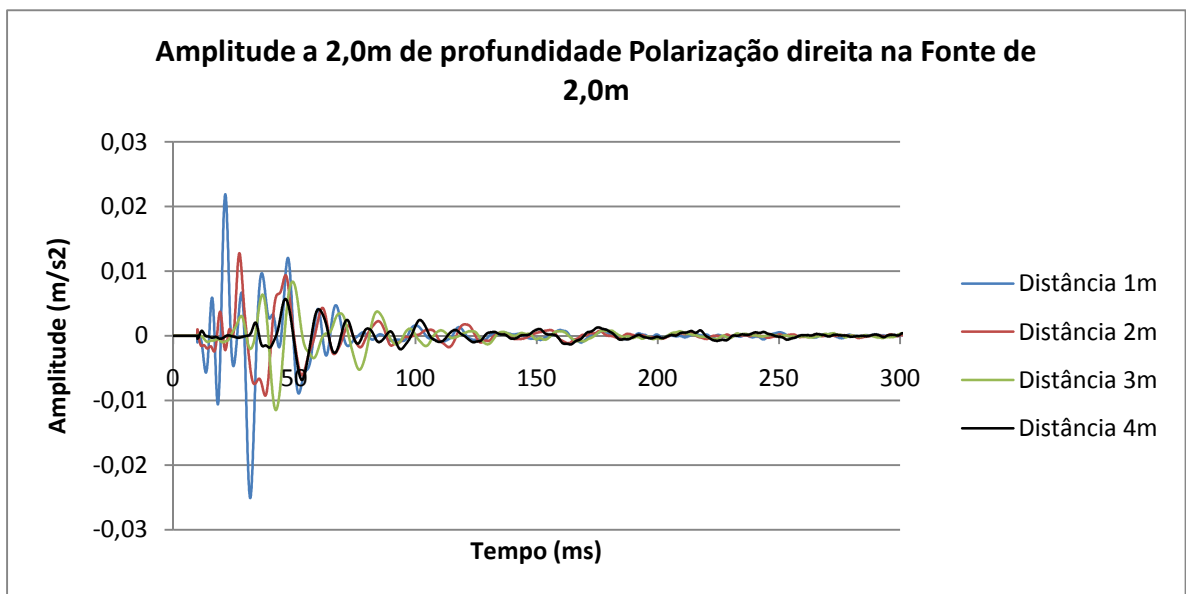


Figura 22 – Avaliação da amplitude de onda a 2,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

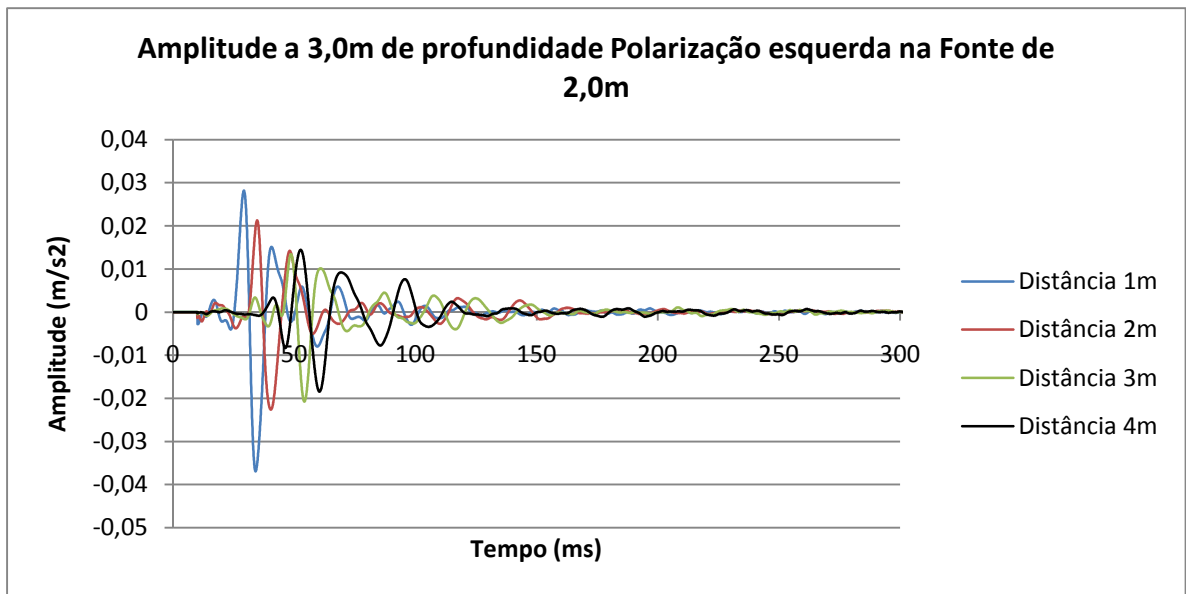


Figura 23 – Avaliação da amplitude de onda a 3,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

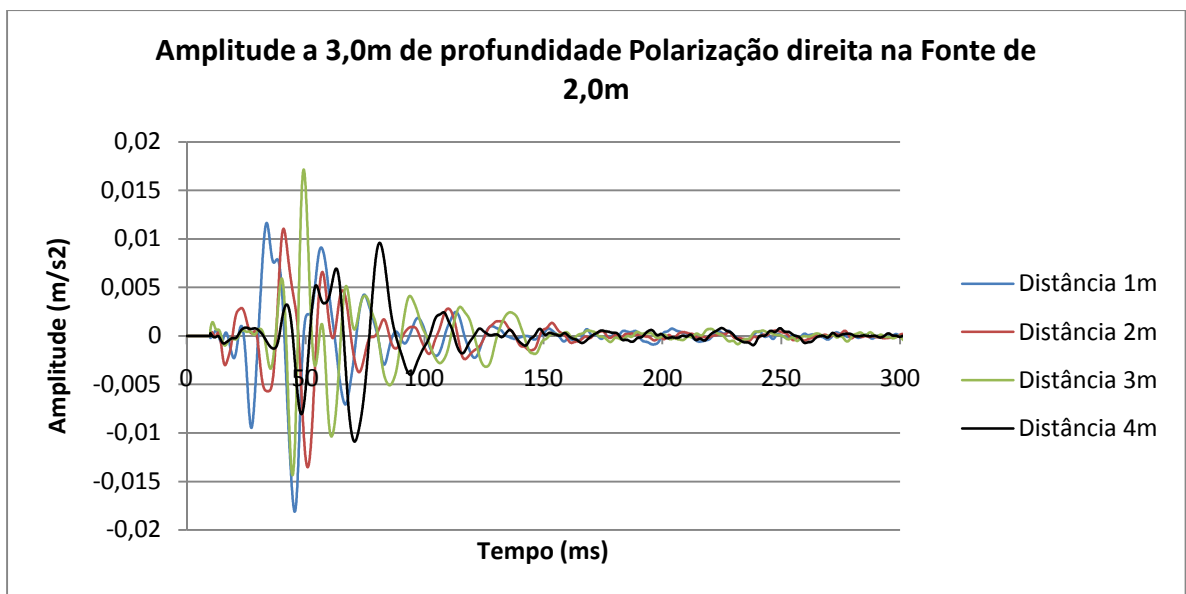


Figura 24 – Avaliação da amplitude de onda a 3,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

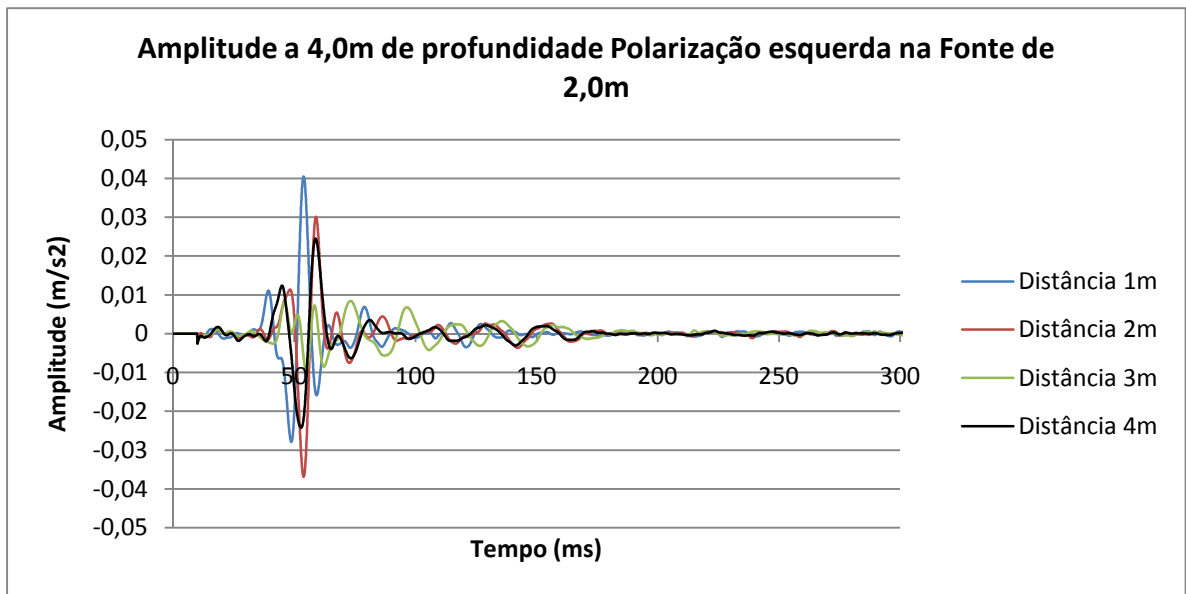


Figura 25 – Avaliação da amplitude de onda a 4,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

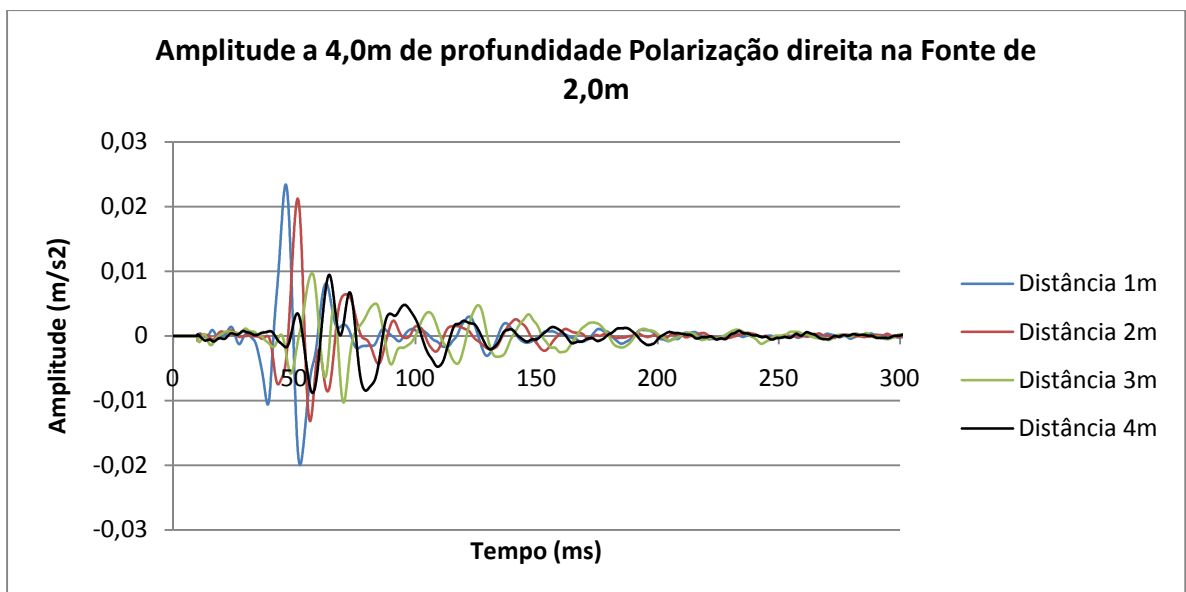


Figura 26 – Avaliação da amplitude de onda a 4,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

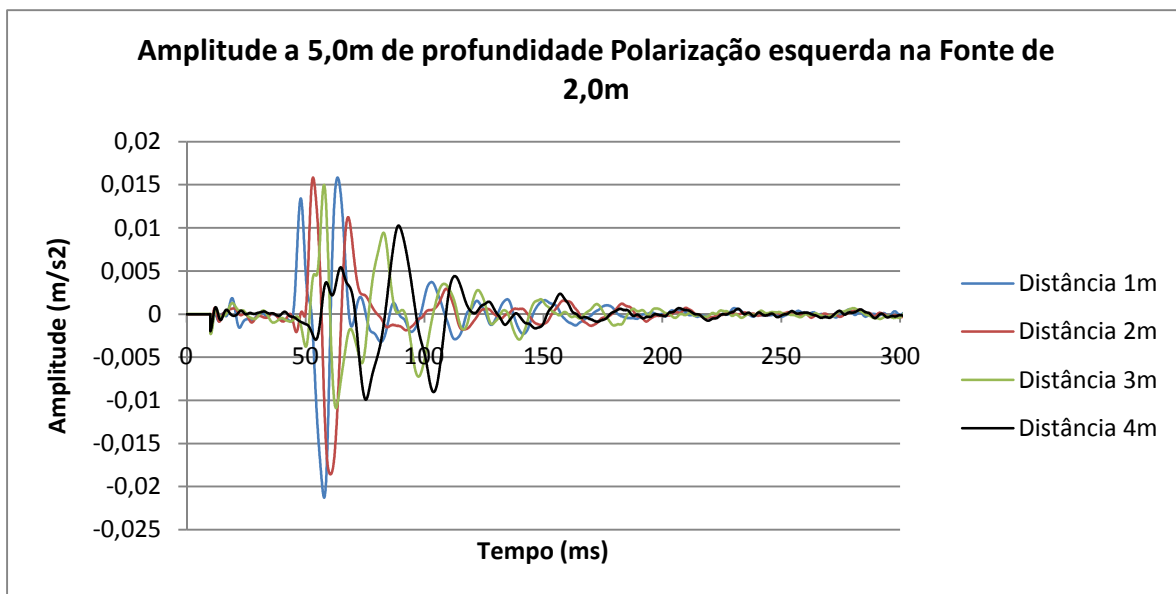


Figura 27 – Avaliação da amplitude de onda a 5,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

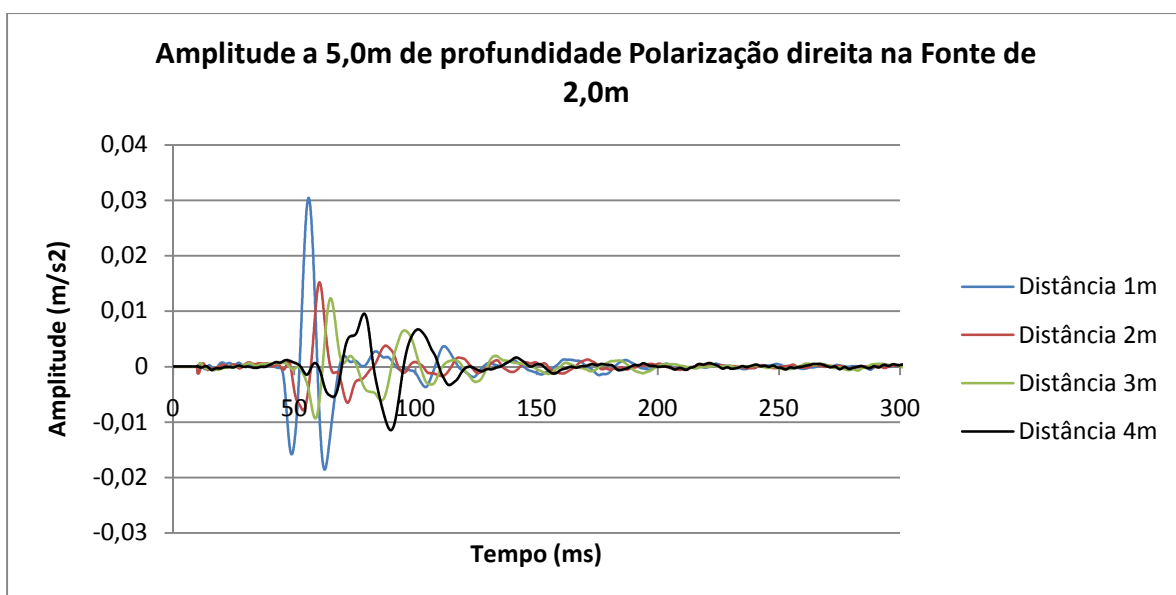


Figura 28 – Avaliação da amplitude de onda a 5,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

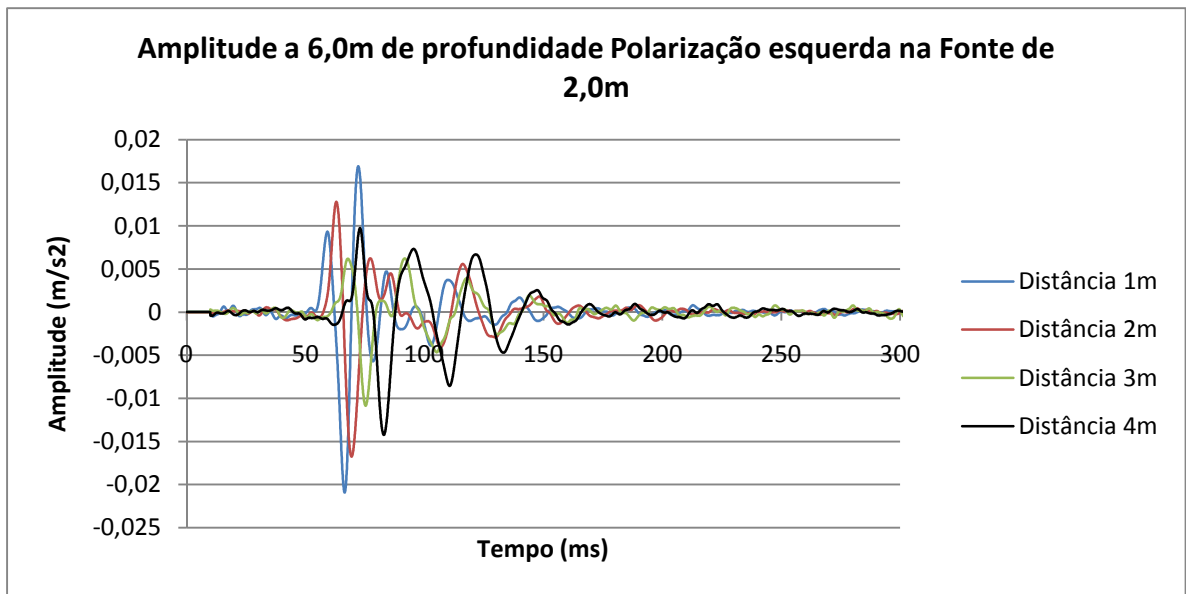


Figura 29 – Avaliação da amplitude de onda a 6,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

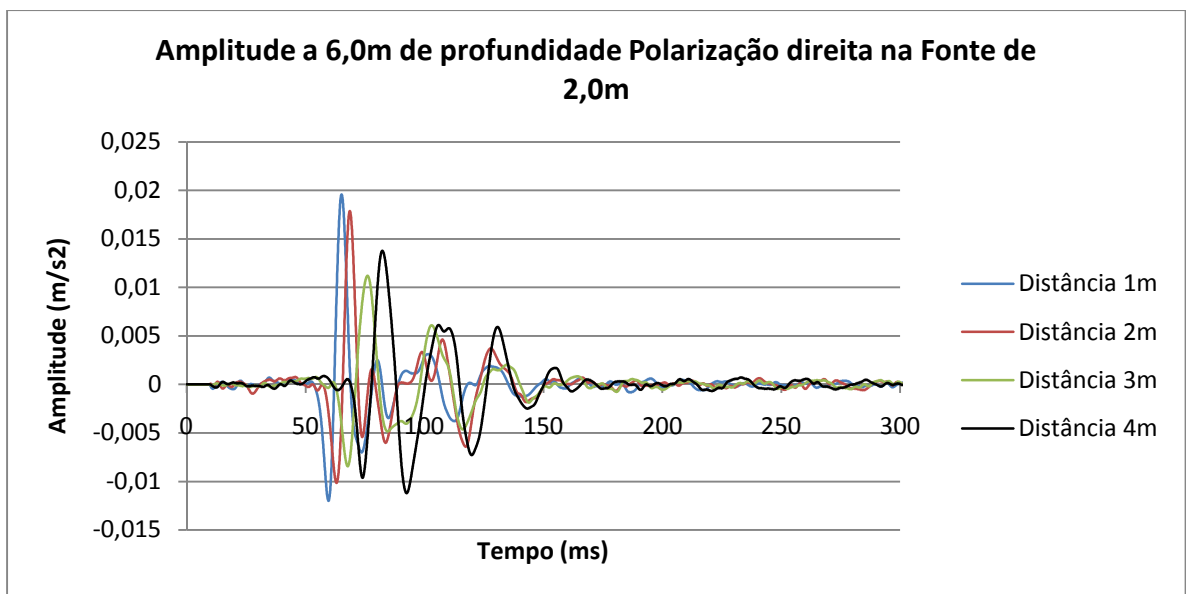


Figura 30 – Avaliação da amplitude de onda a 6,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

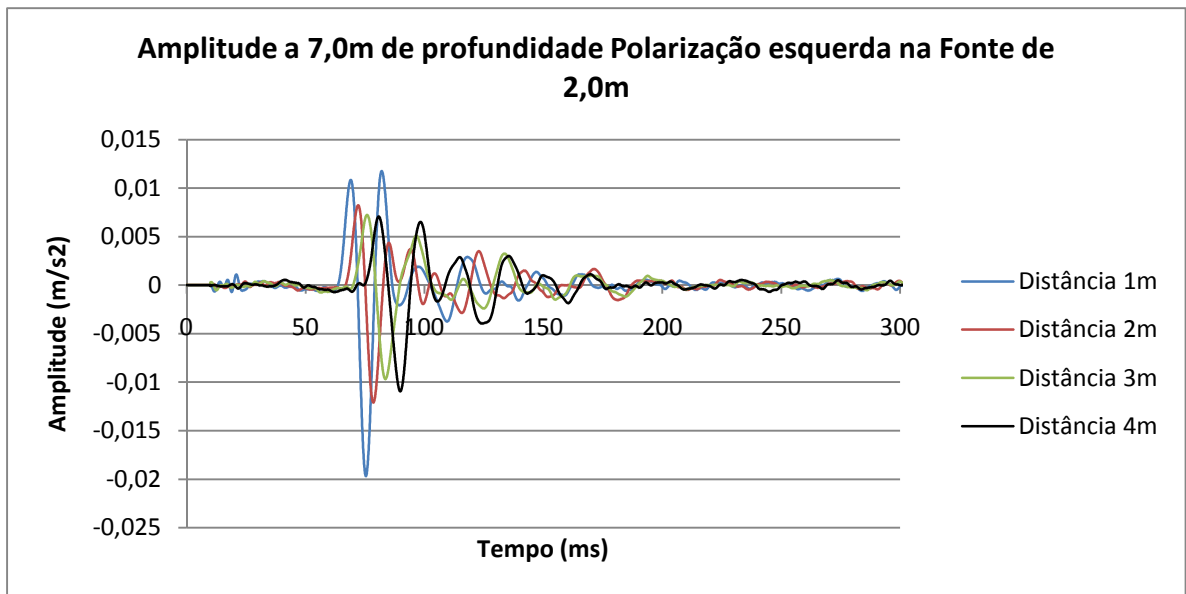


Figura 31 – Avaliação da amplitude de onda a 7,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

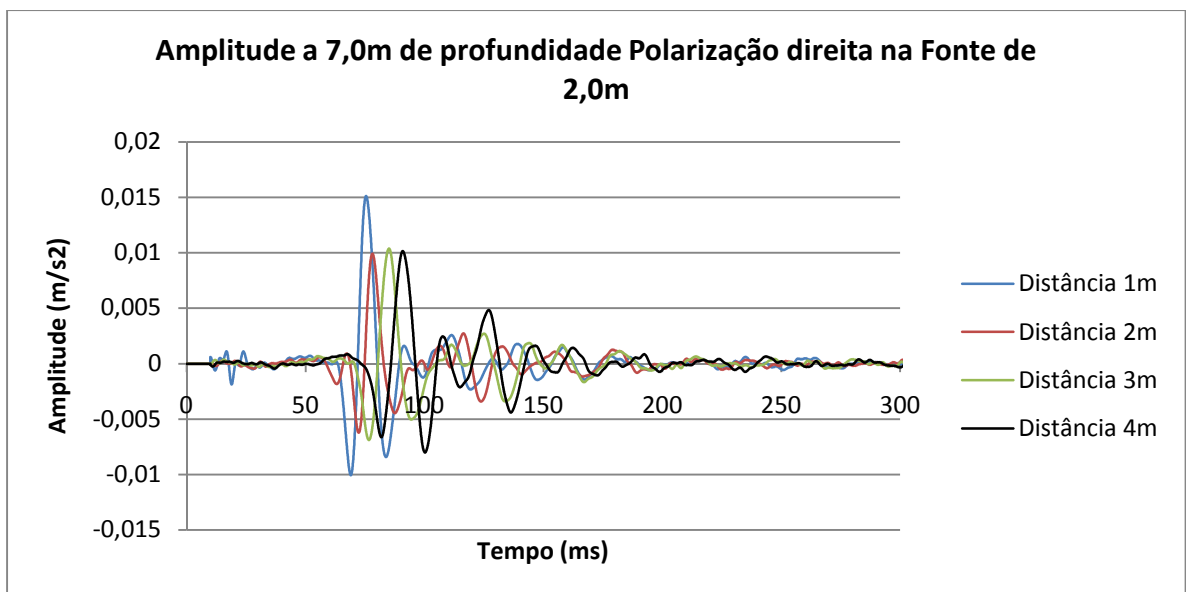


Figura 32 – Avaliação da amplitude de onda a 7,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

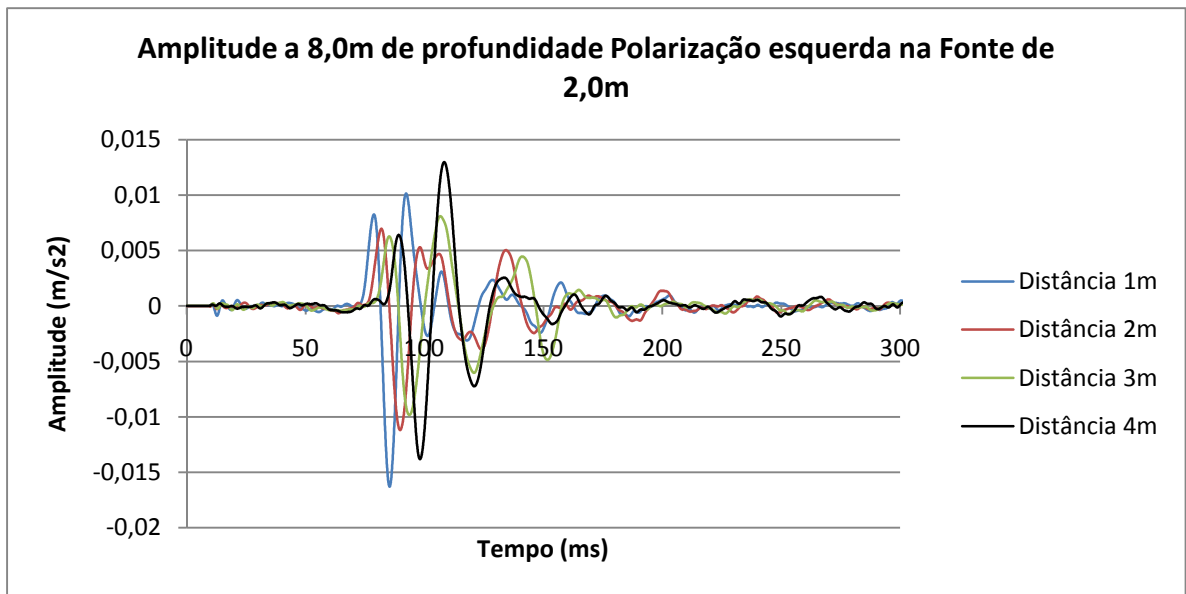


Figura 33 – Avaliação da amplitude de onda a 8,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

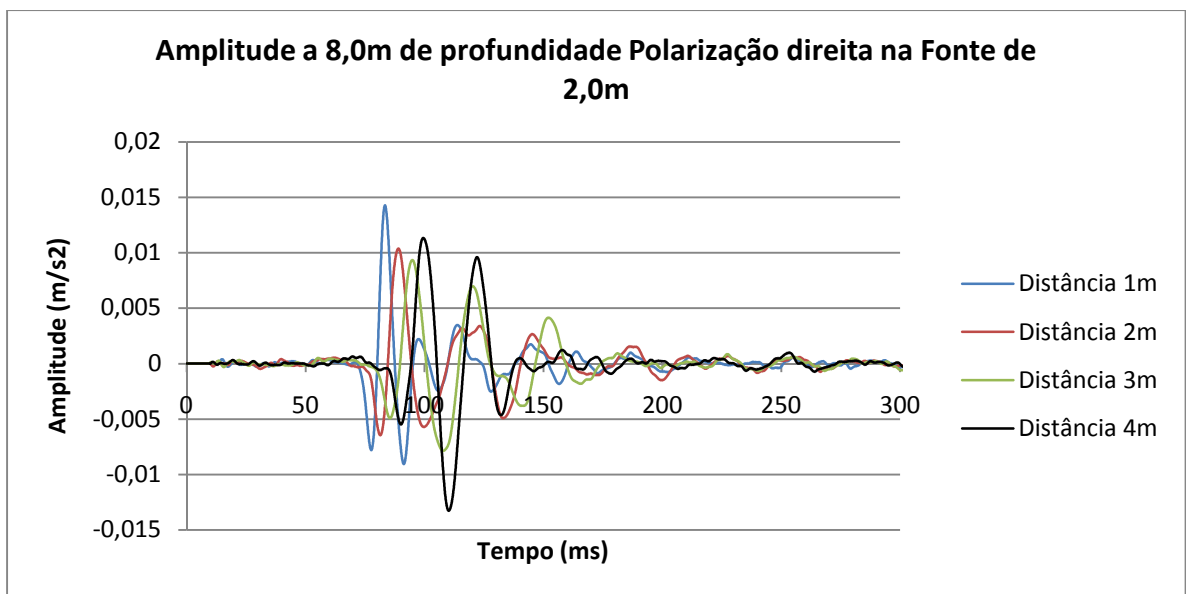


Figura 34 – Avaliação da amplitude de onda a 8,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

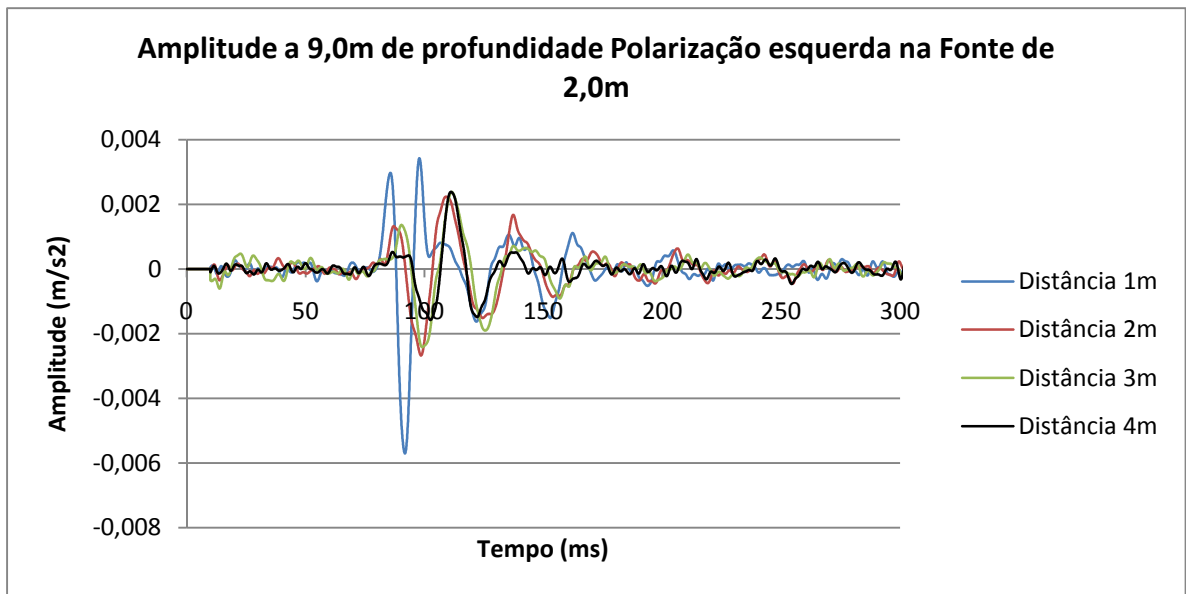


Figura 35 – Avaliação da amplitude de onda a 9,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

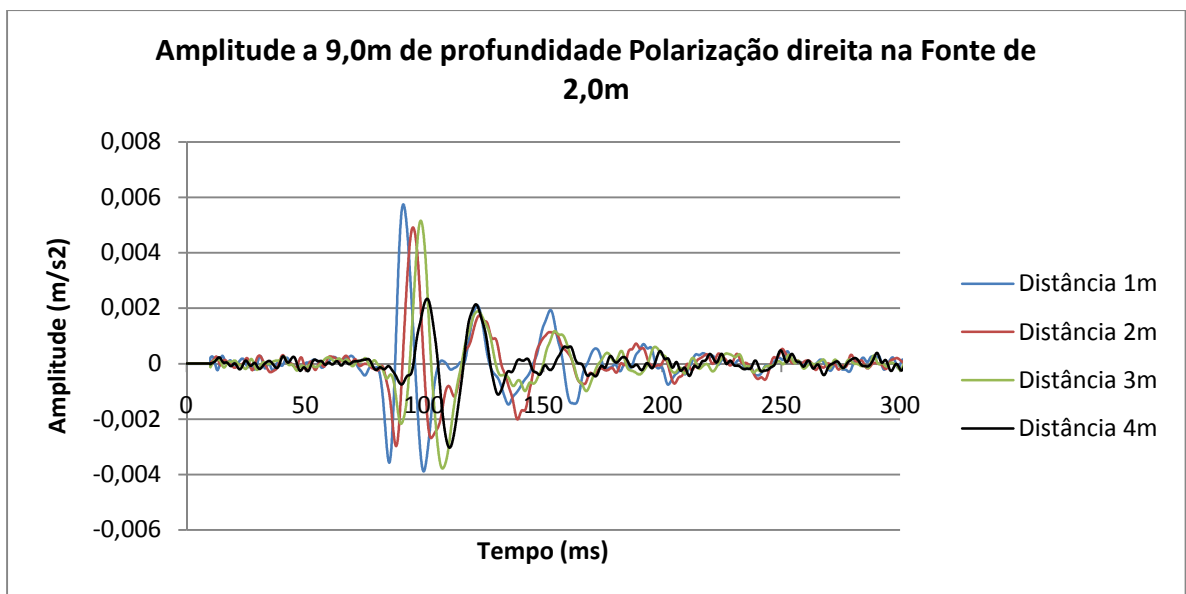


Figura 36 – Avaliação da amplitude de onda a 9,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

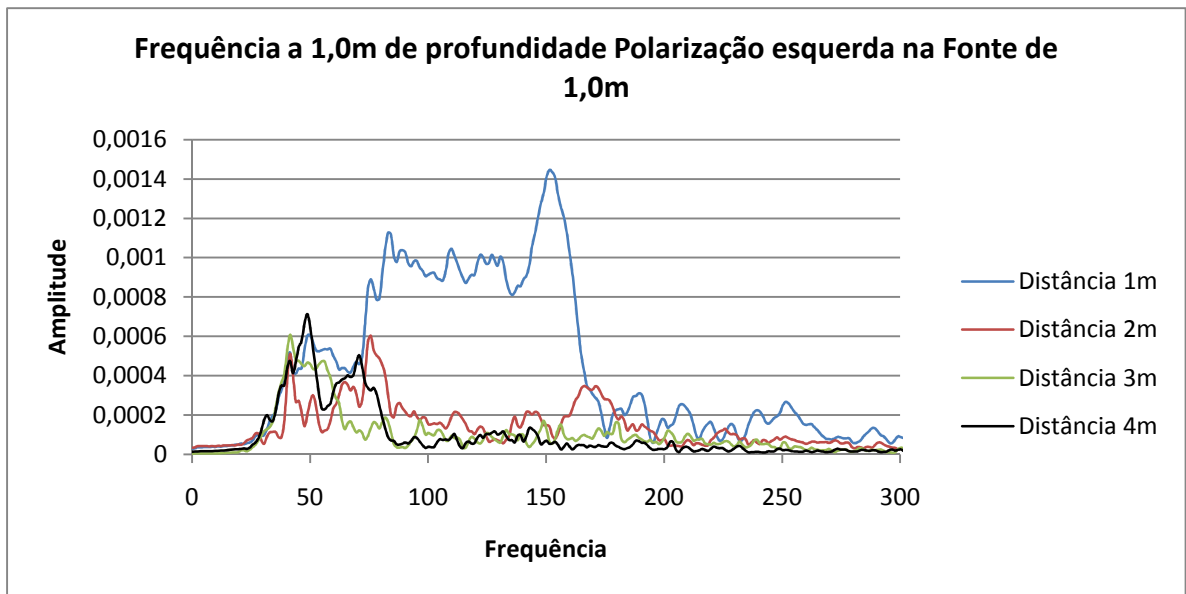


Figura 37 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 1,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

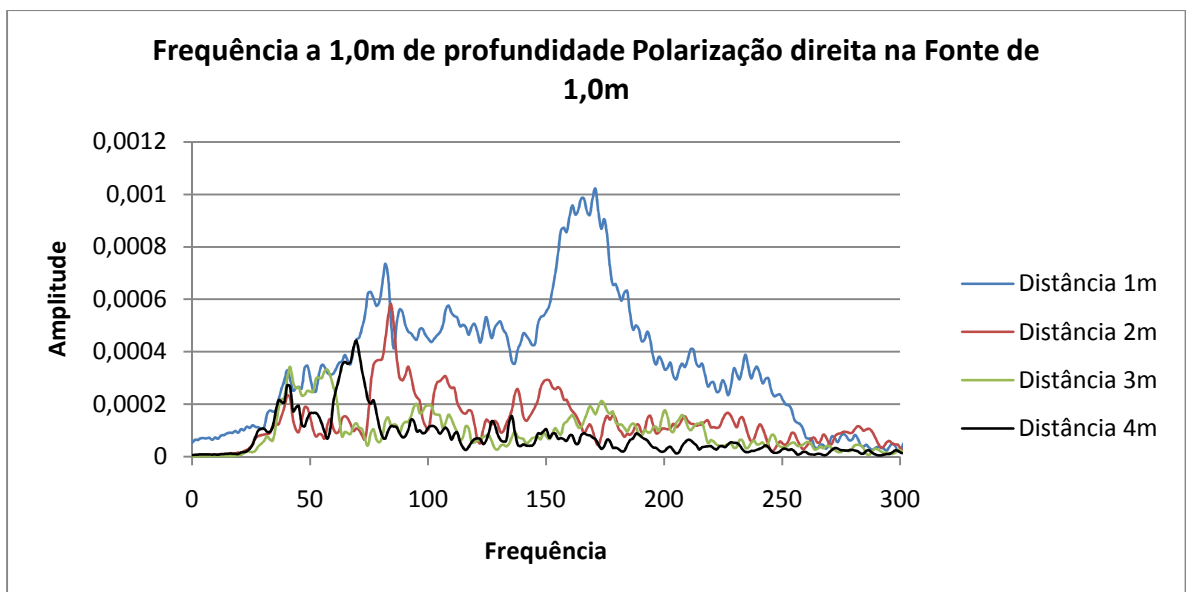


Figura 38 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 1,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

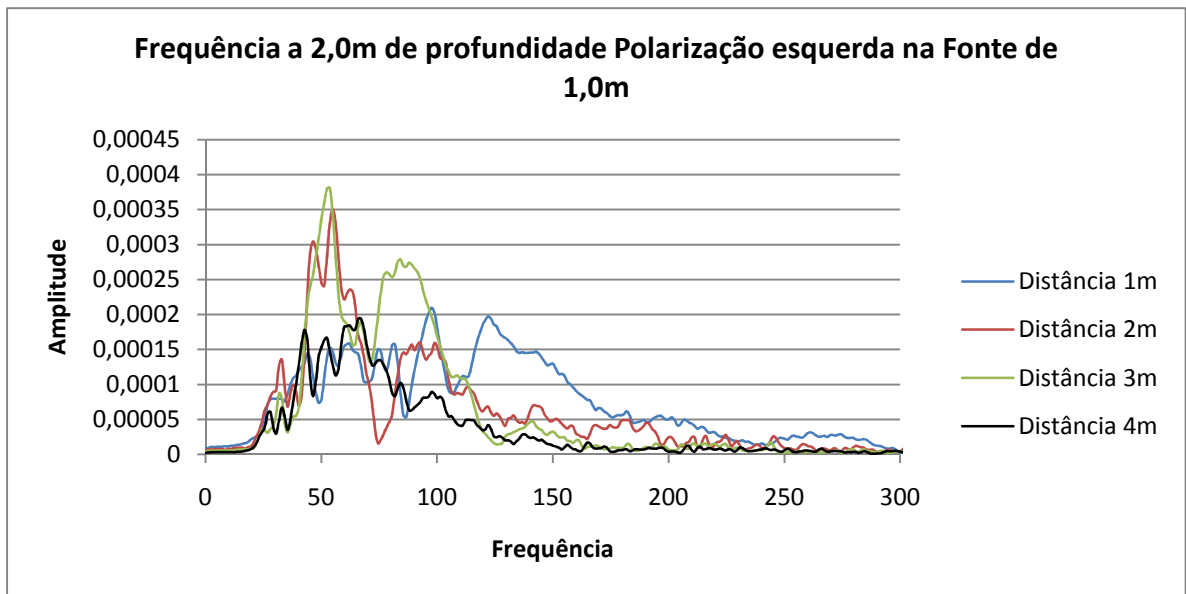


Figura 39 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 2,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

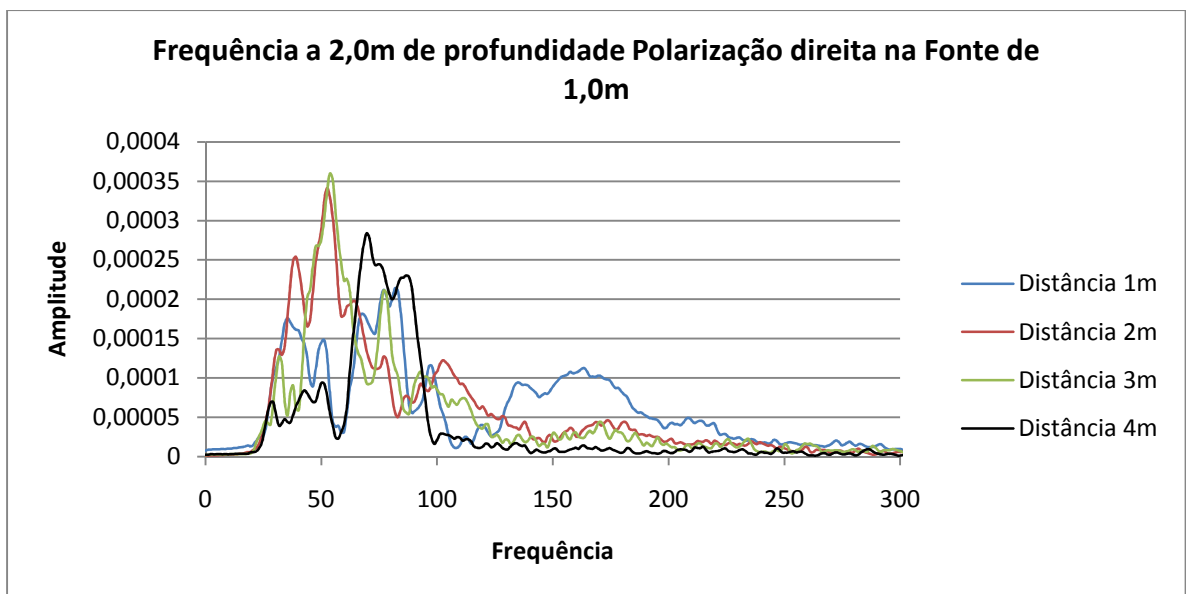


Figura 40 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 2,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

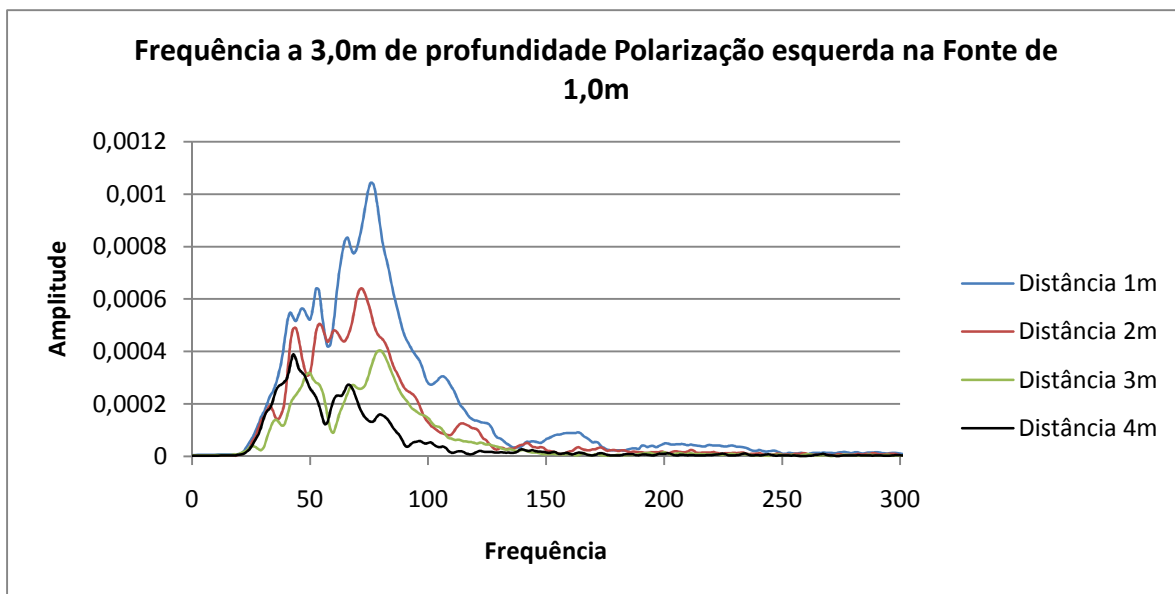


Figura 41 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 3,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

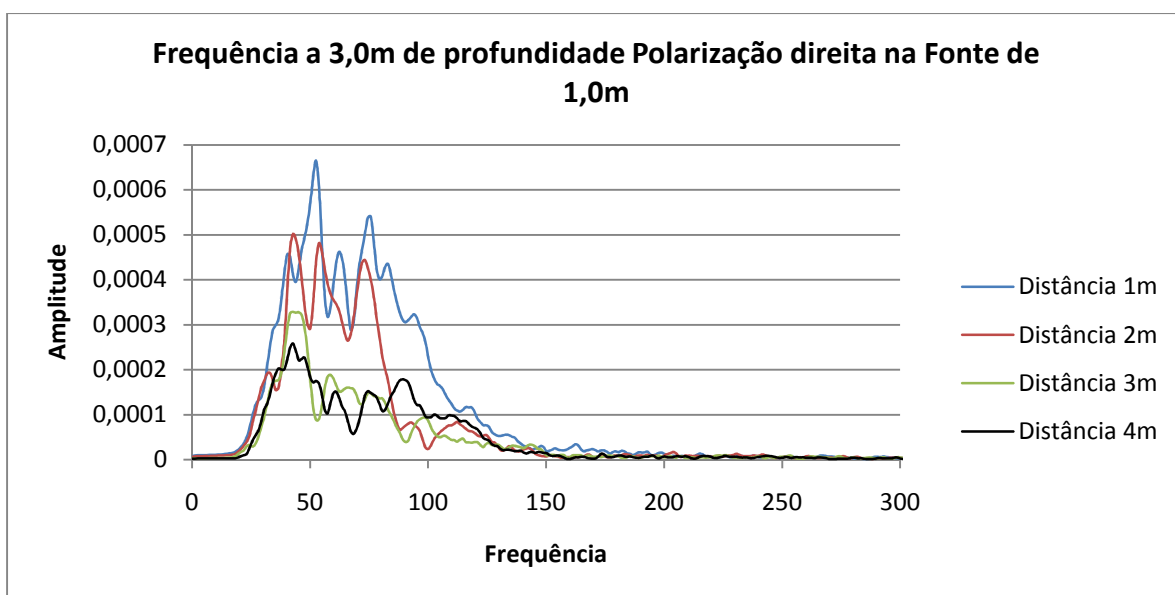


Figura 42 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 3,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

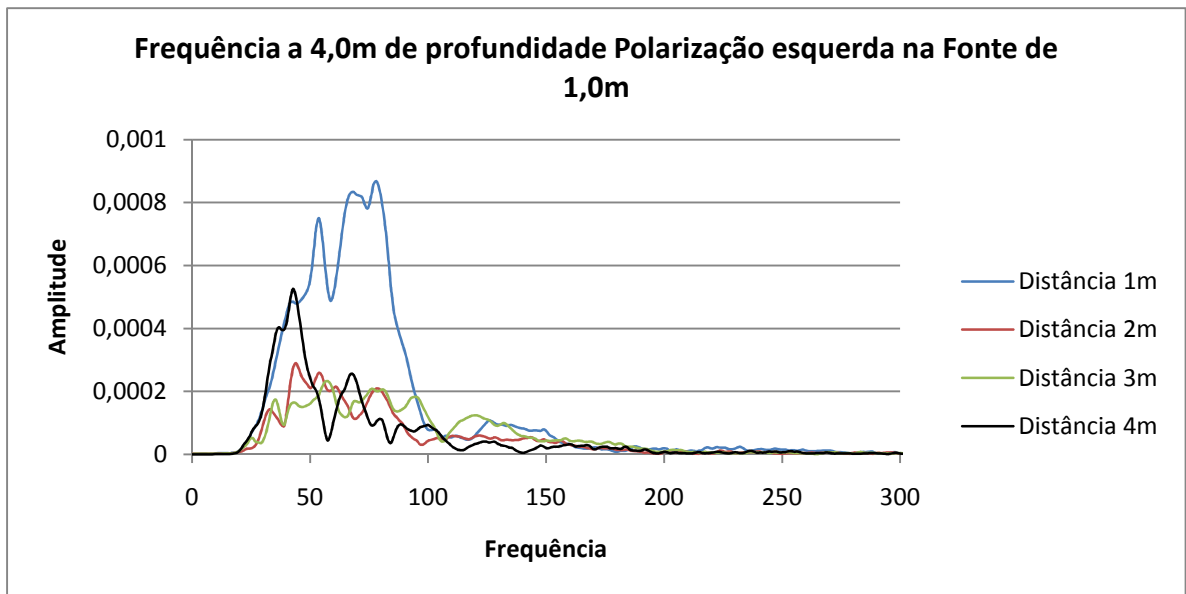


Figura 43 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 4,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

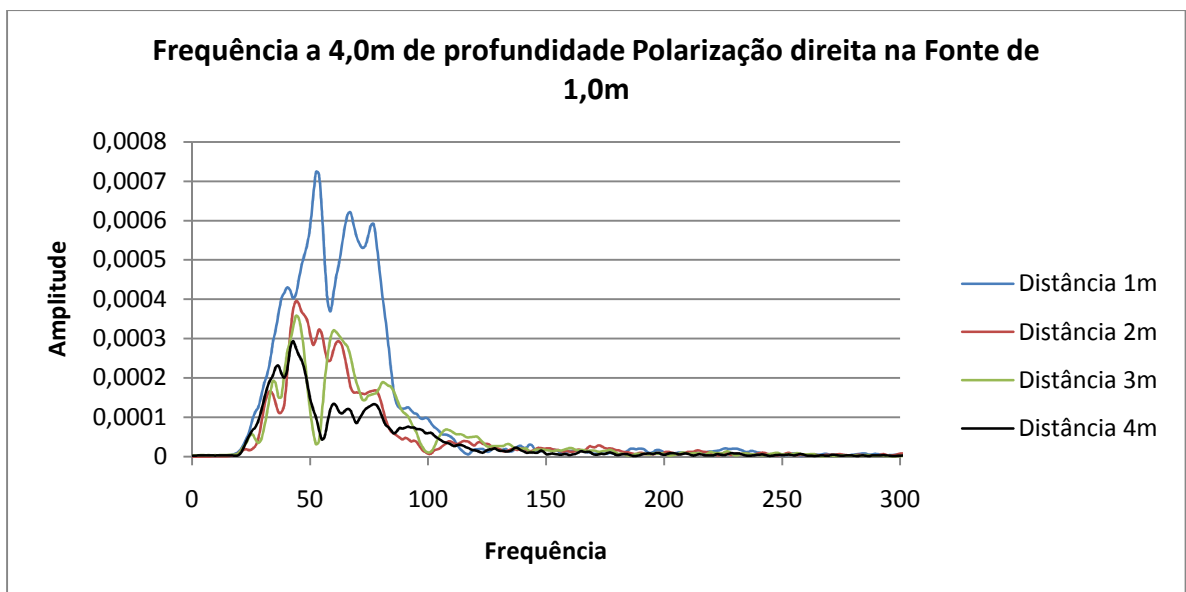


Figura 44 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 4,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

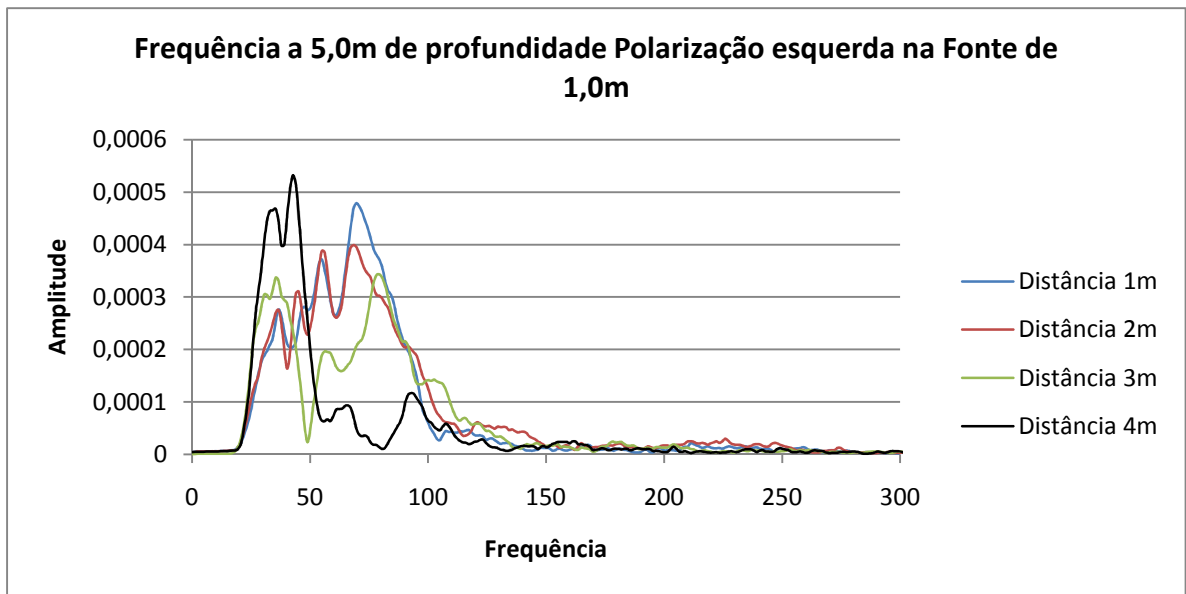


Figura 45 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 5,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

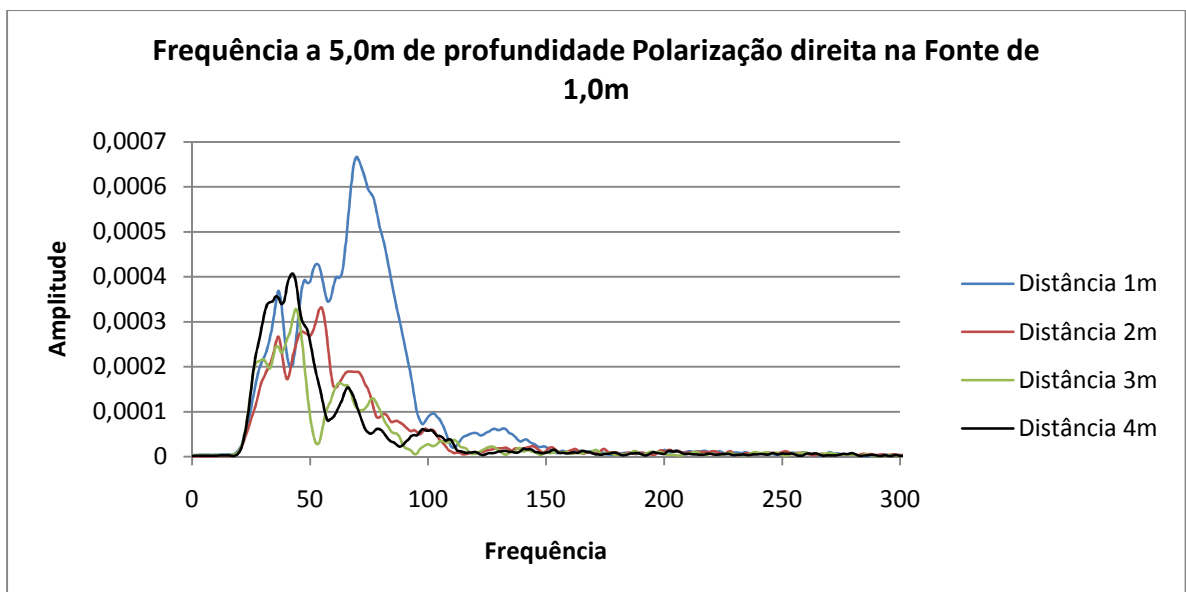


Figura 46 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 5,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

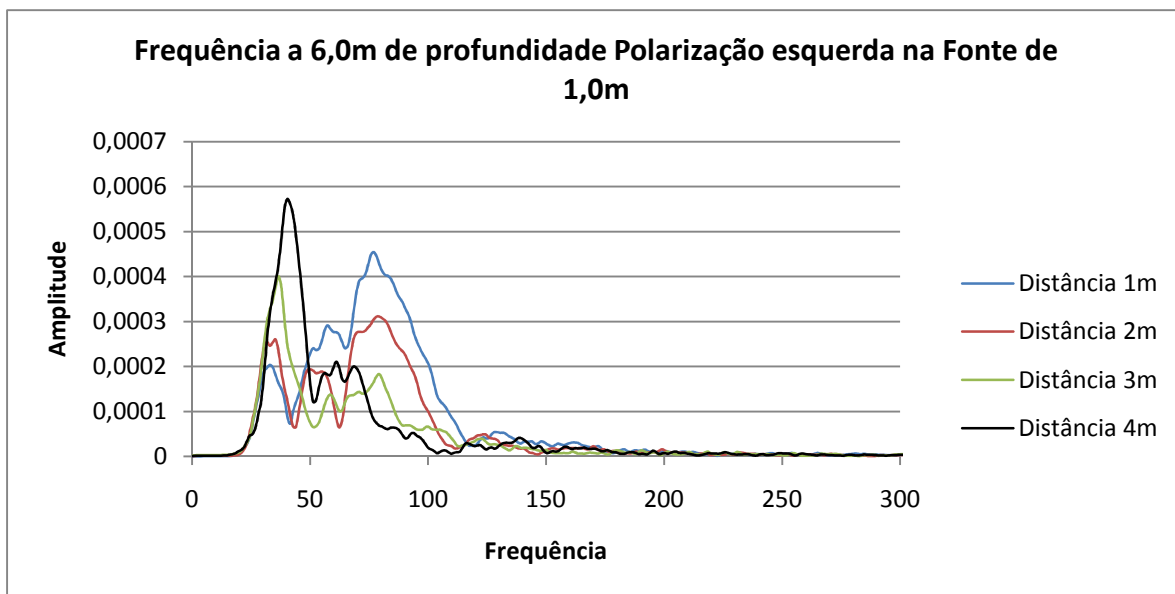


Figura 47 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 6,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

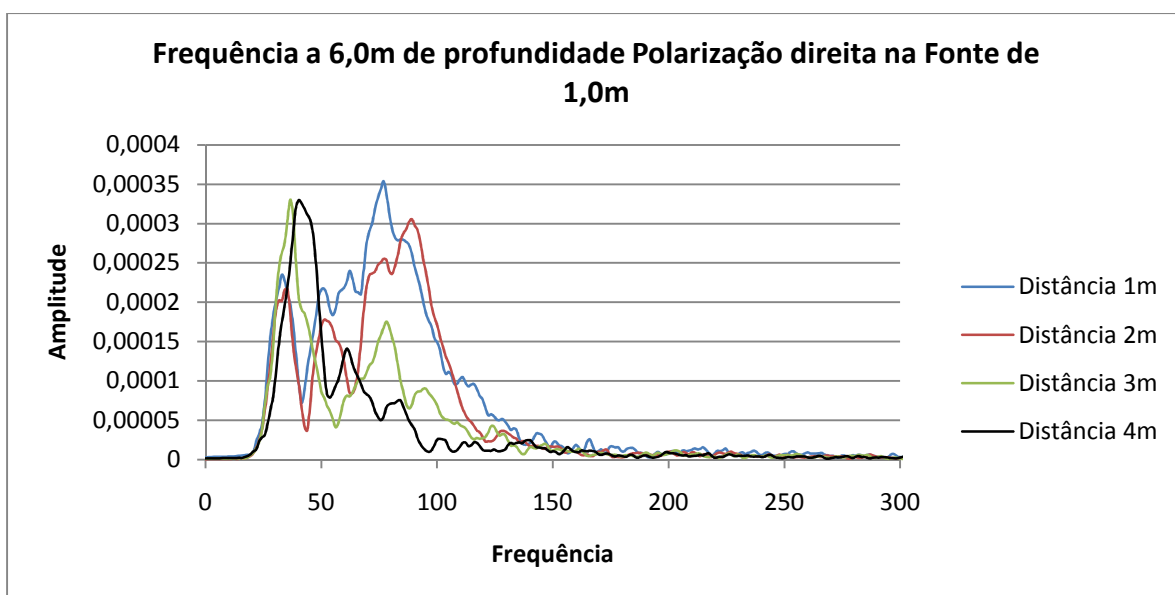


Figura 48 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 6,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

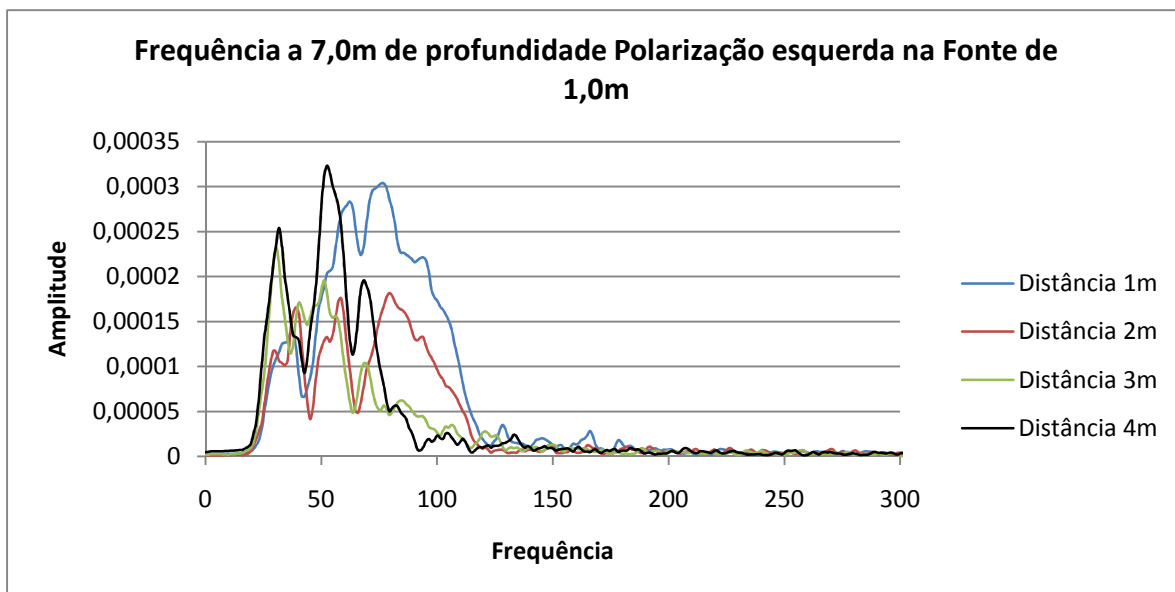


Figura 49 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 7,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

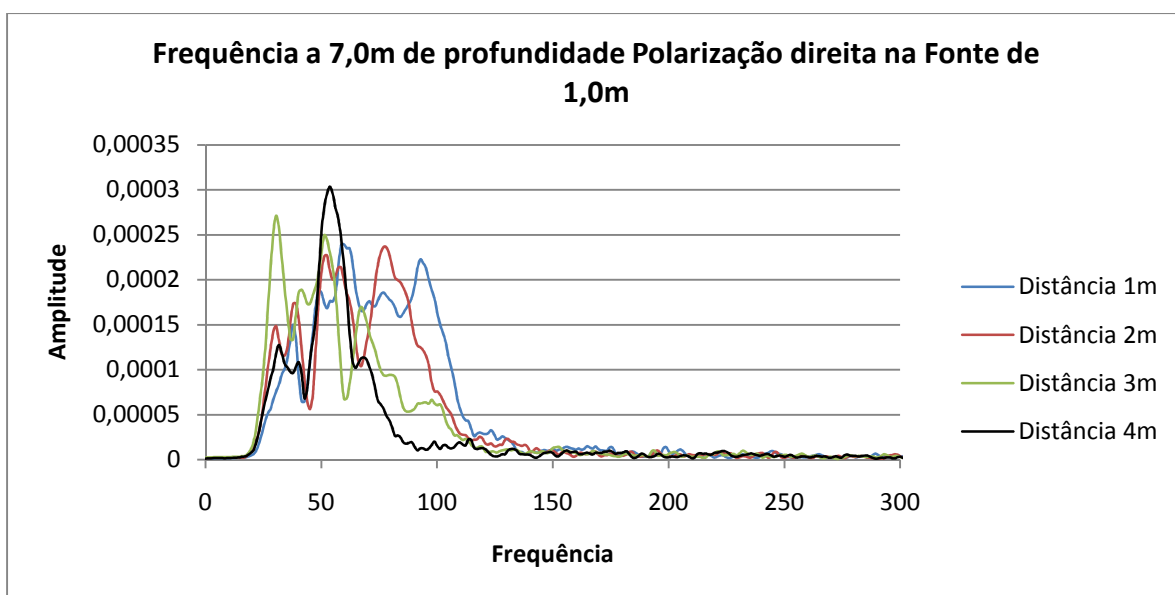


Figura 50 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 7,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

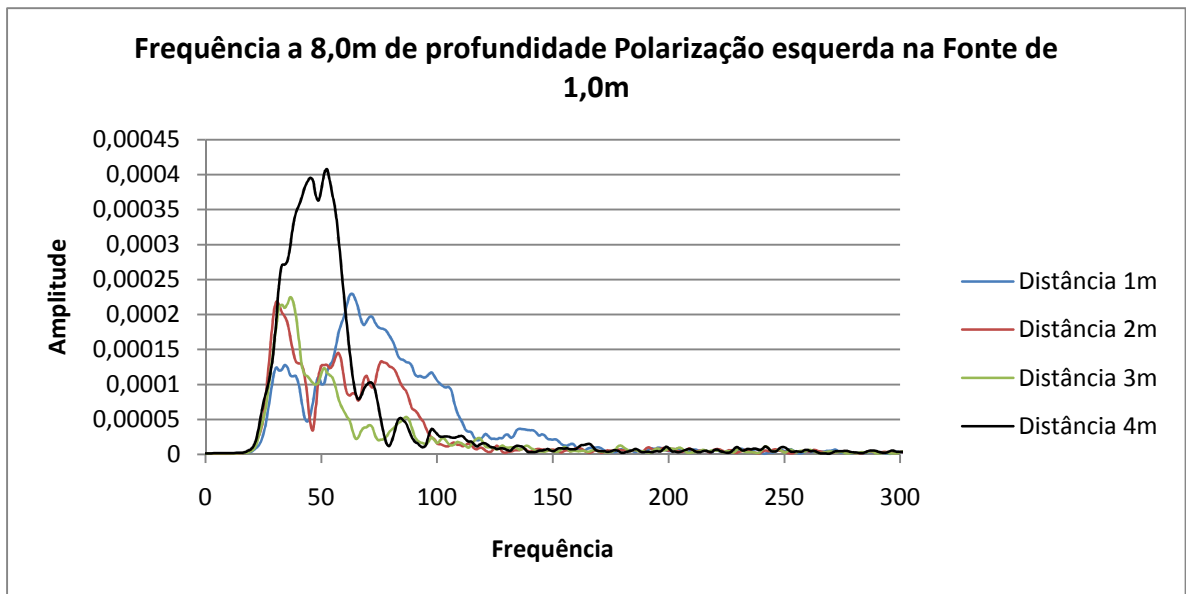


Figura 51 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 8,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

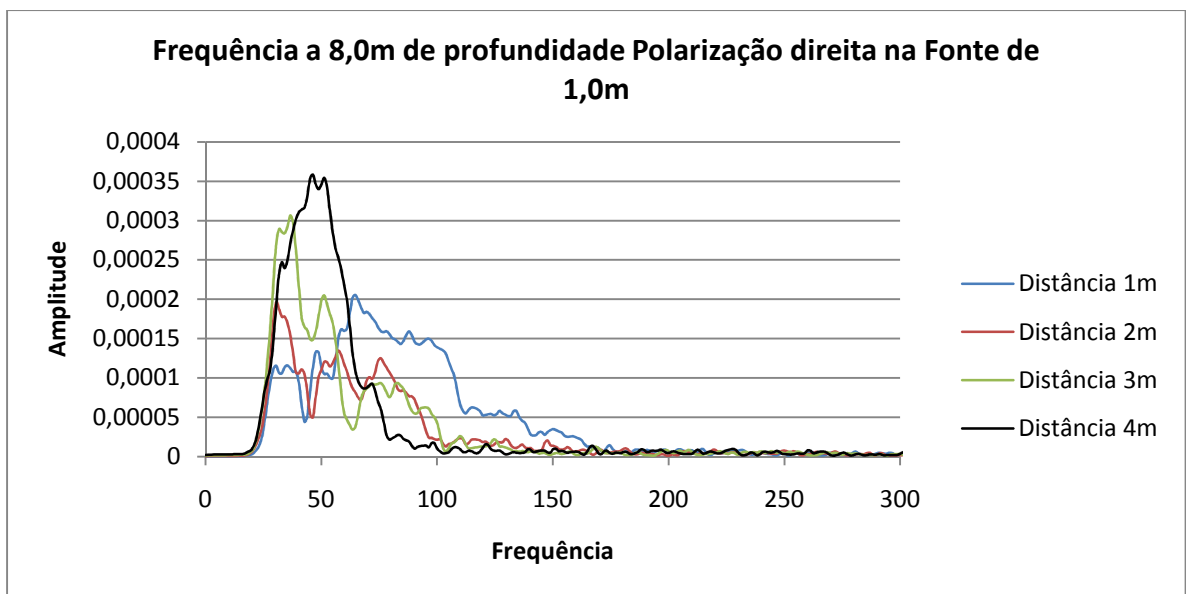


Figura 52 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 8,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

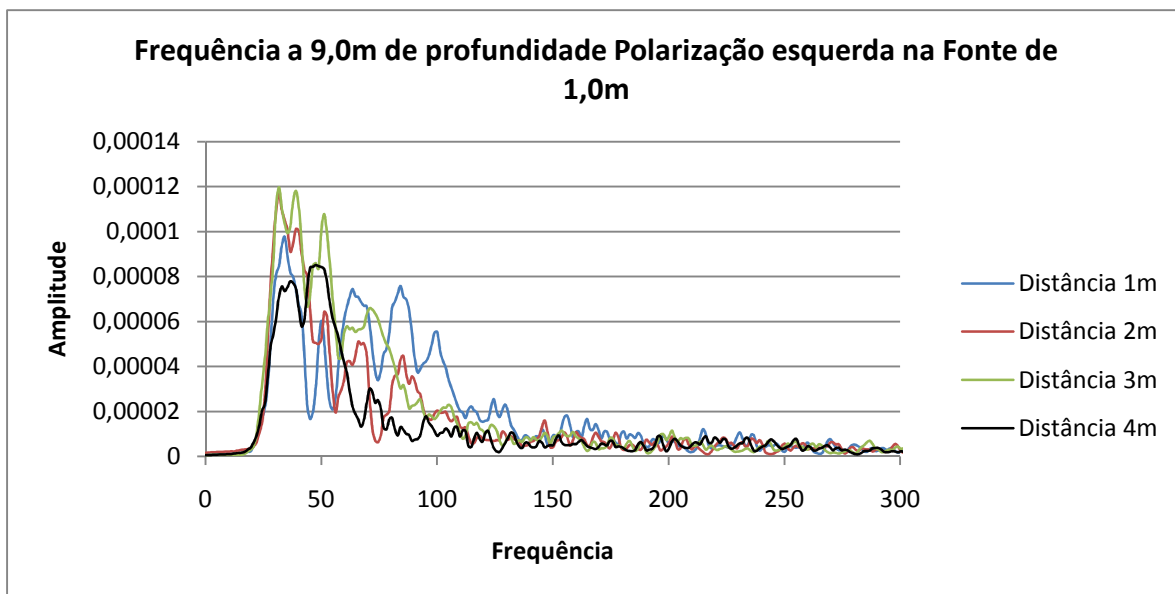


Figura 53 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 9,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

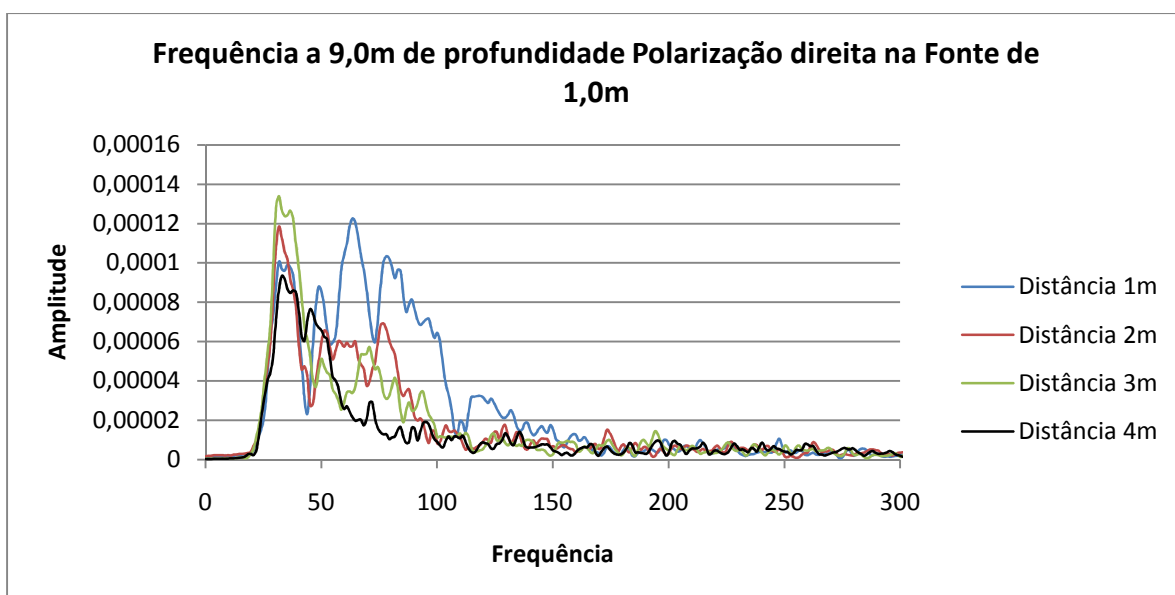


Figura 54 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 9,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 1,0m

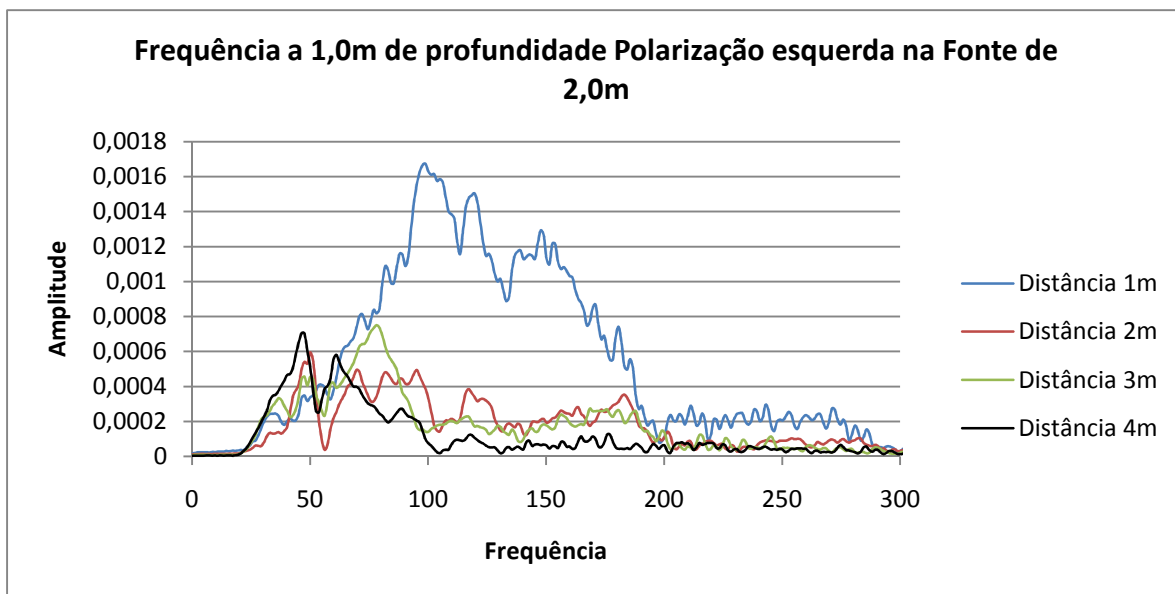


Figura 55 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 1,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

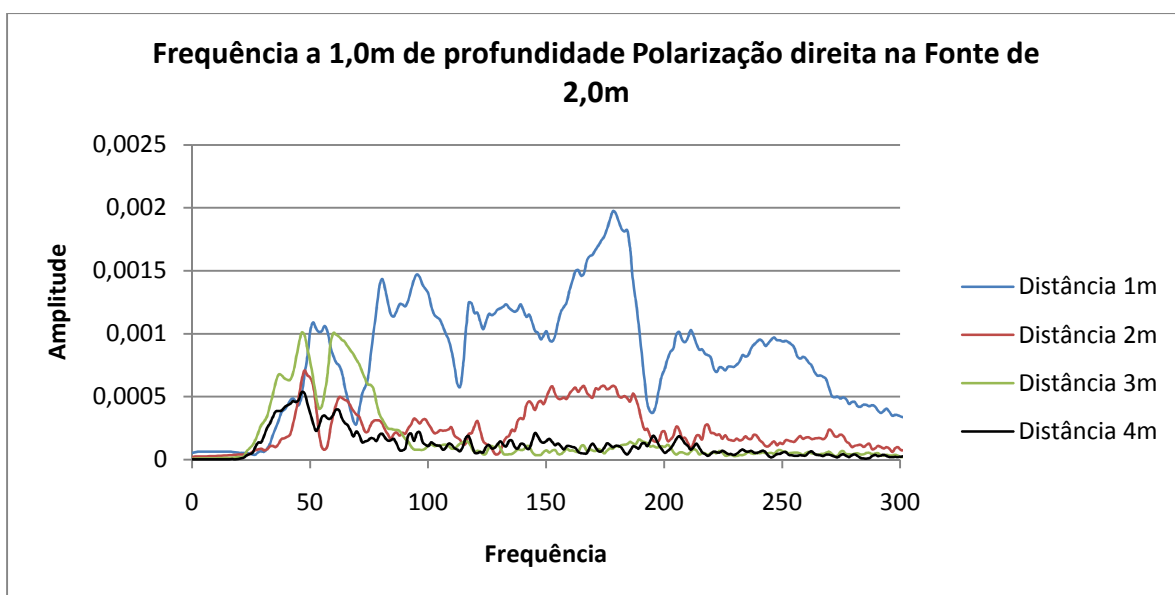


Figura 56 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 1,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

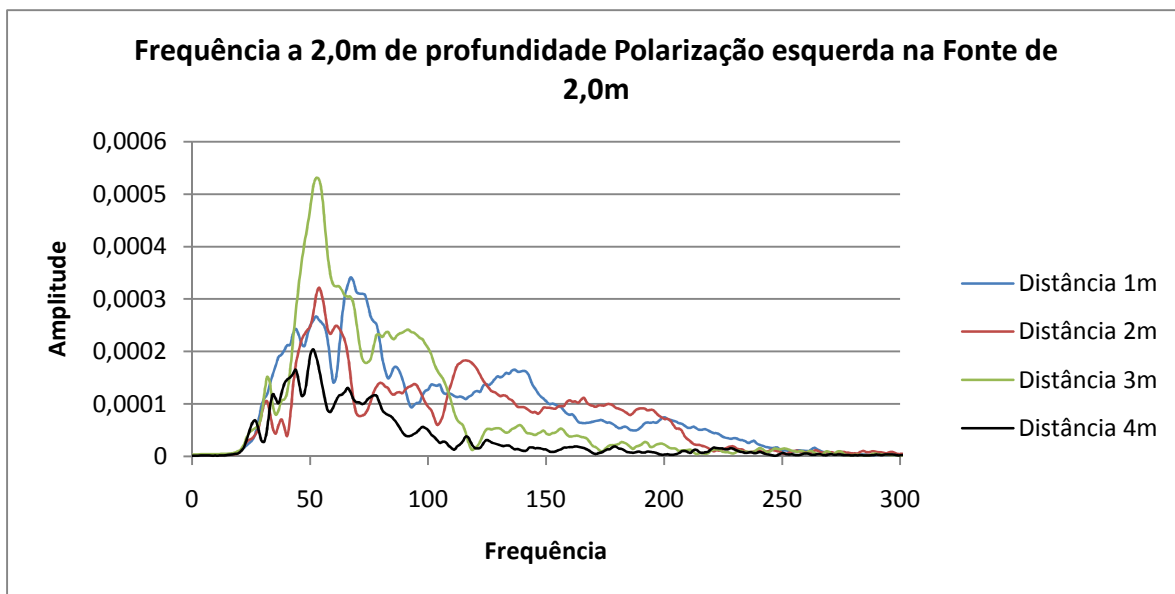


Figura 57 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 2,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

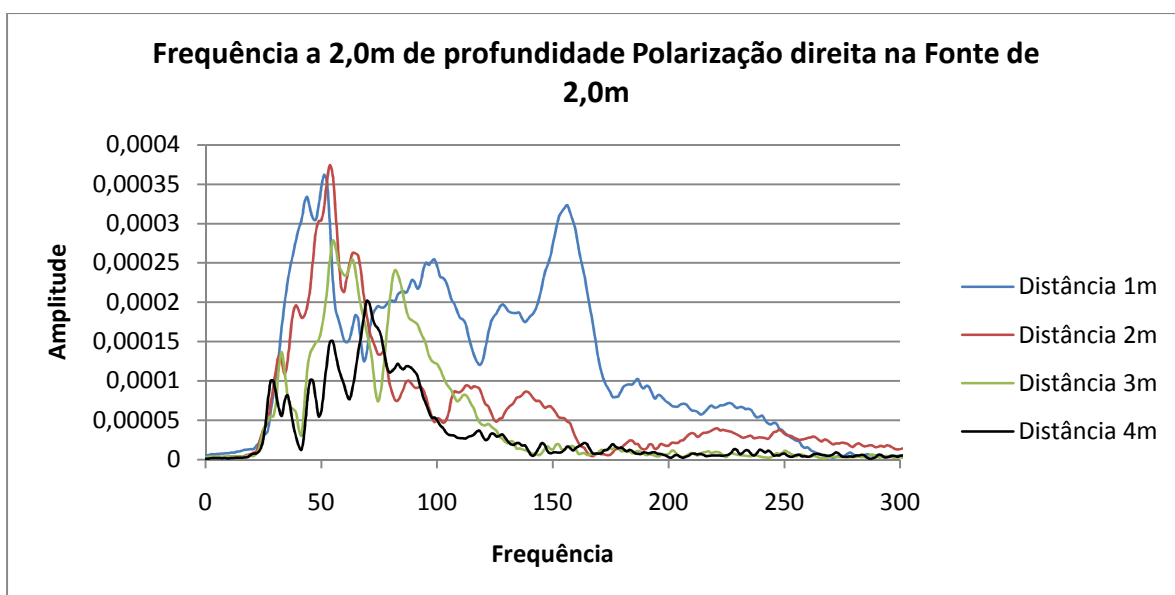


Figura 58 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 2,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

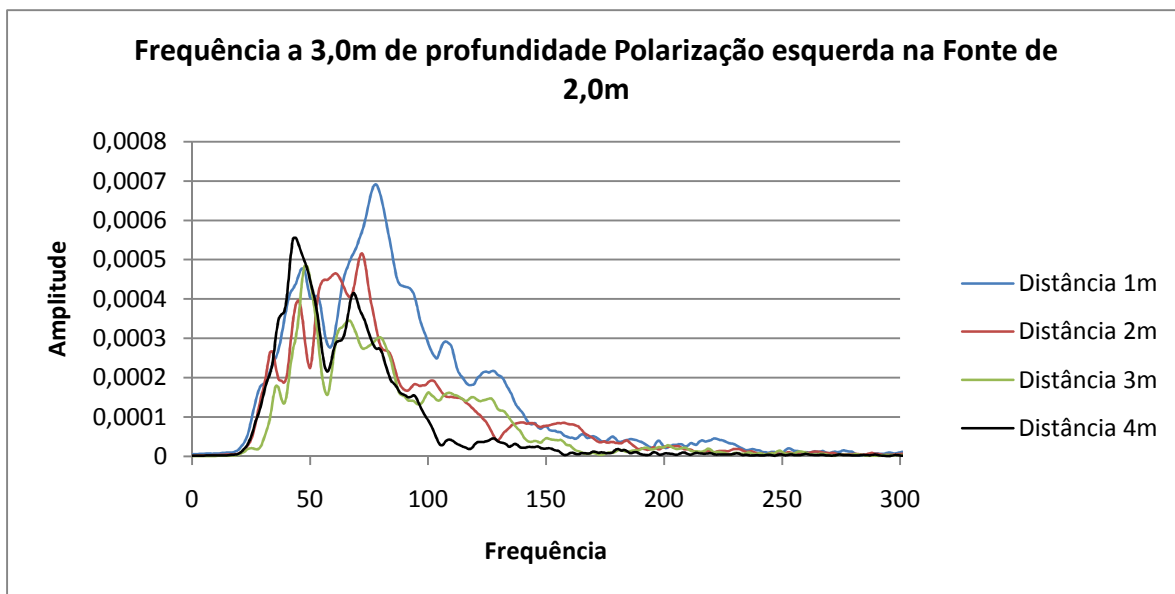


Figura 59 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 3,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

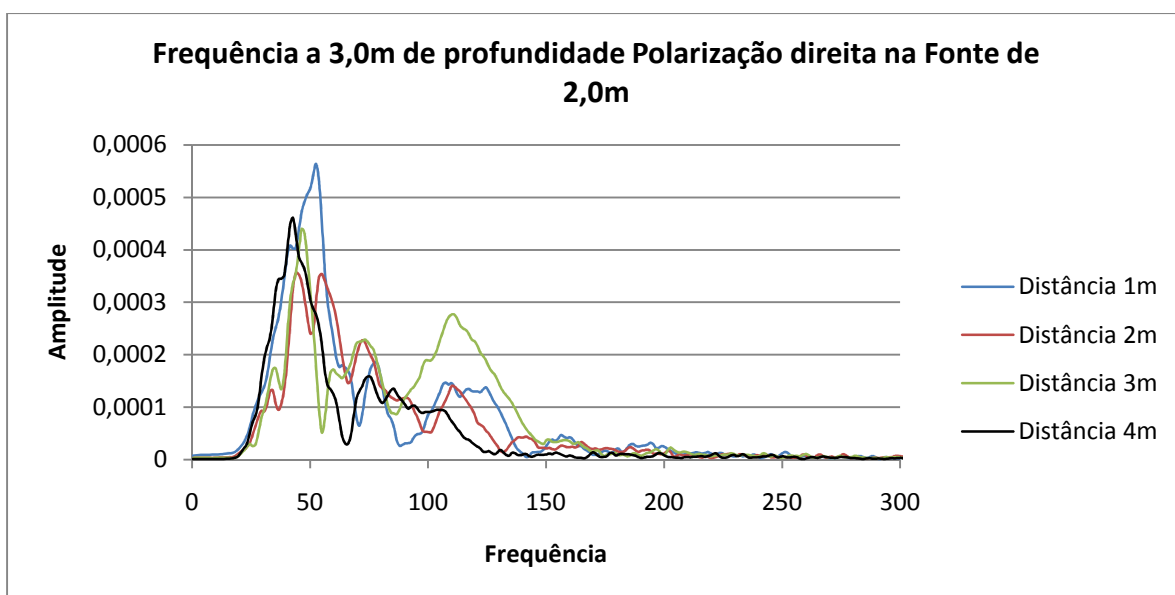


Figura 60 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 3,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

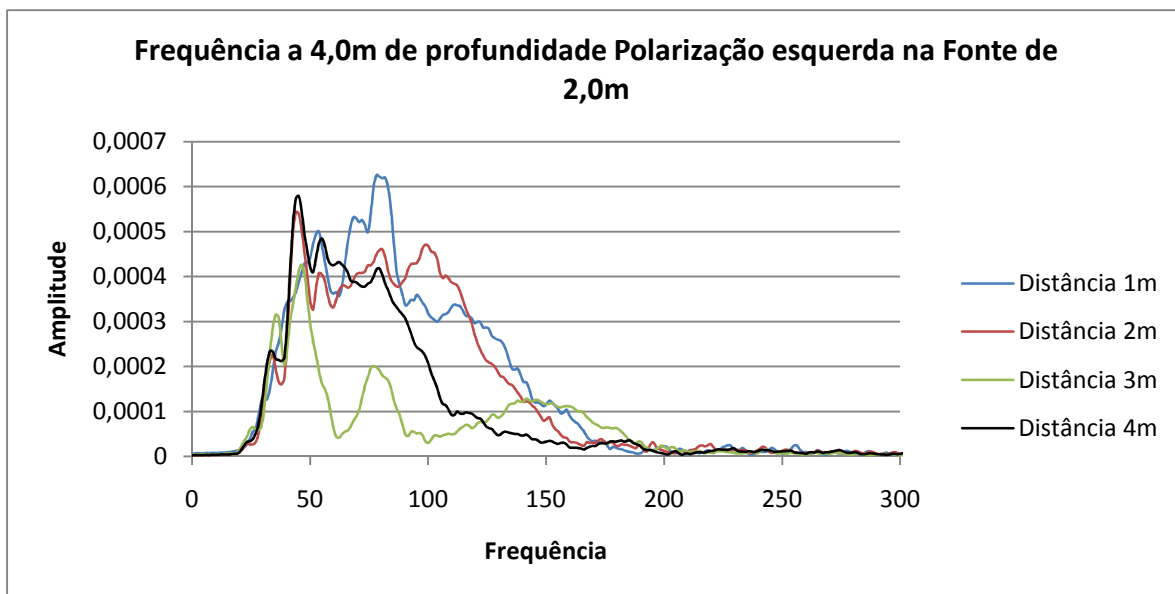


Figura 61 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 4,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

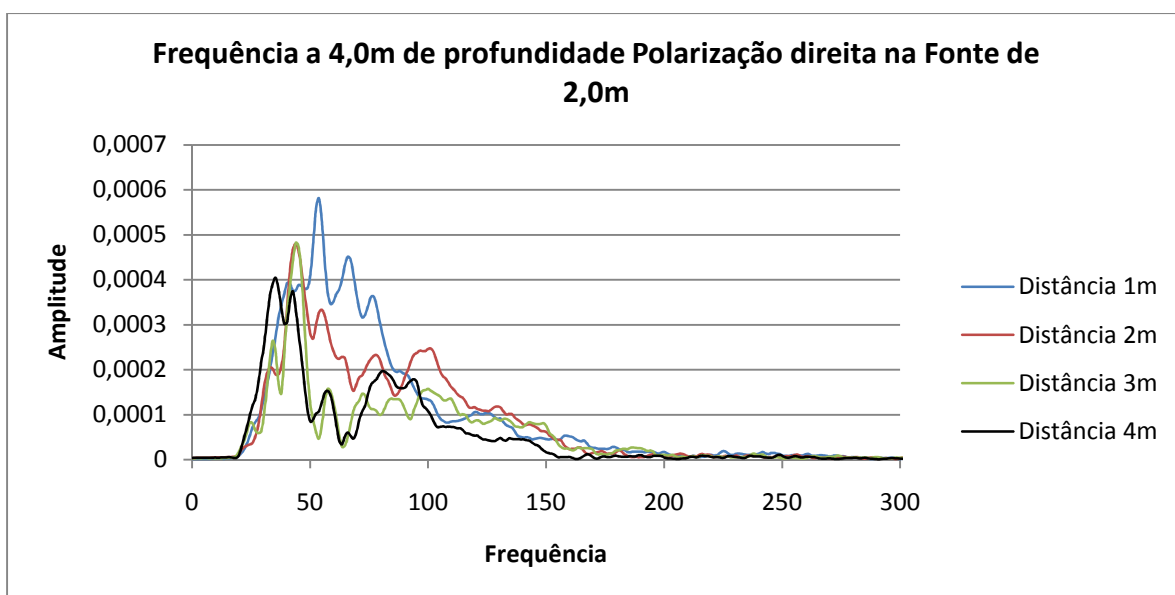


Figura 62 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 4,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

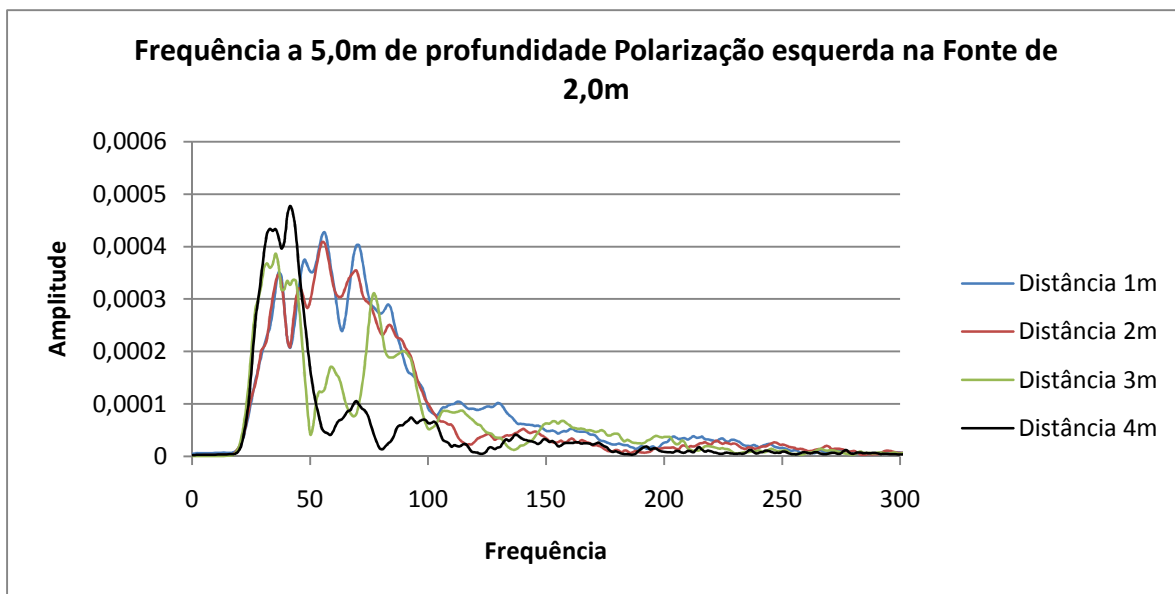


Figura 63 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 5,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

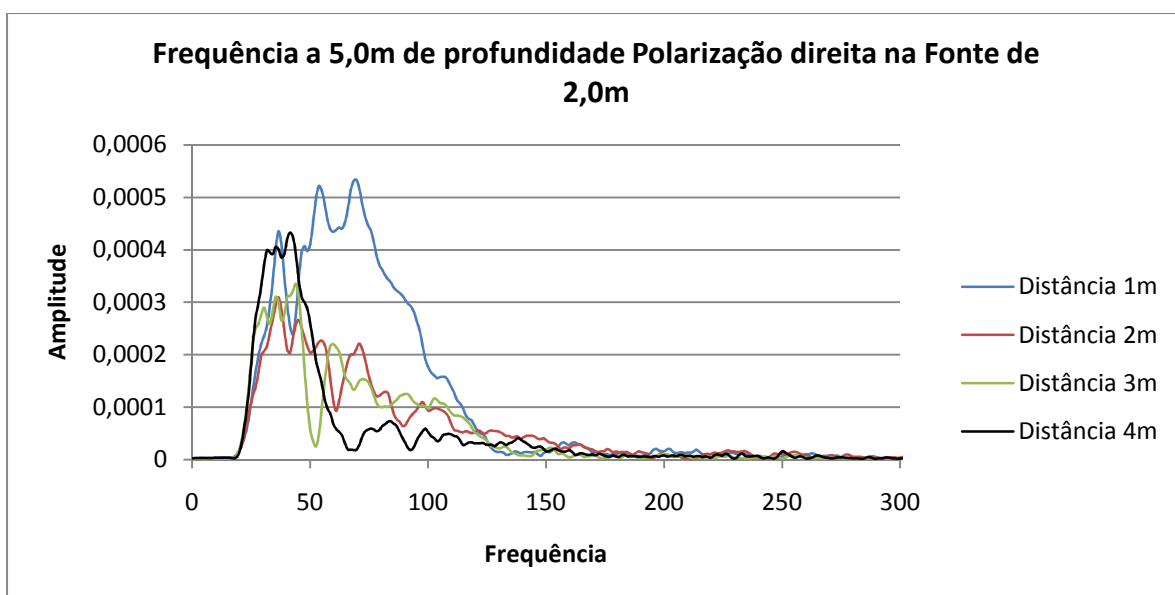


Figura 64 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 5,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

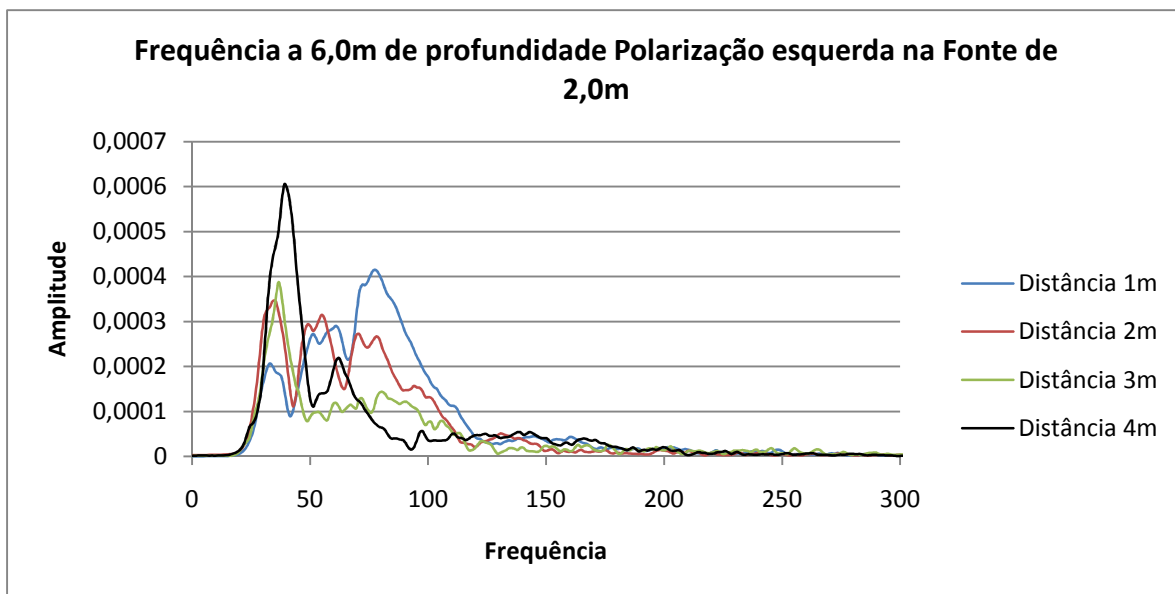


Figura 65 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 6,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

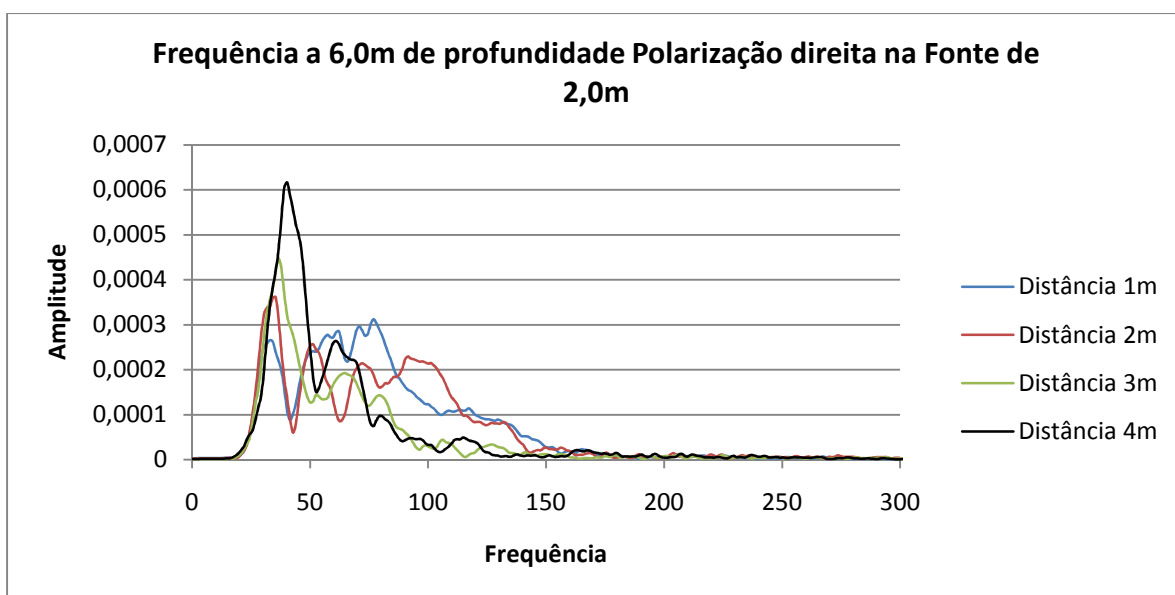


Figura 66 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 6,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

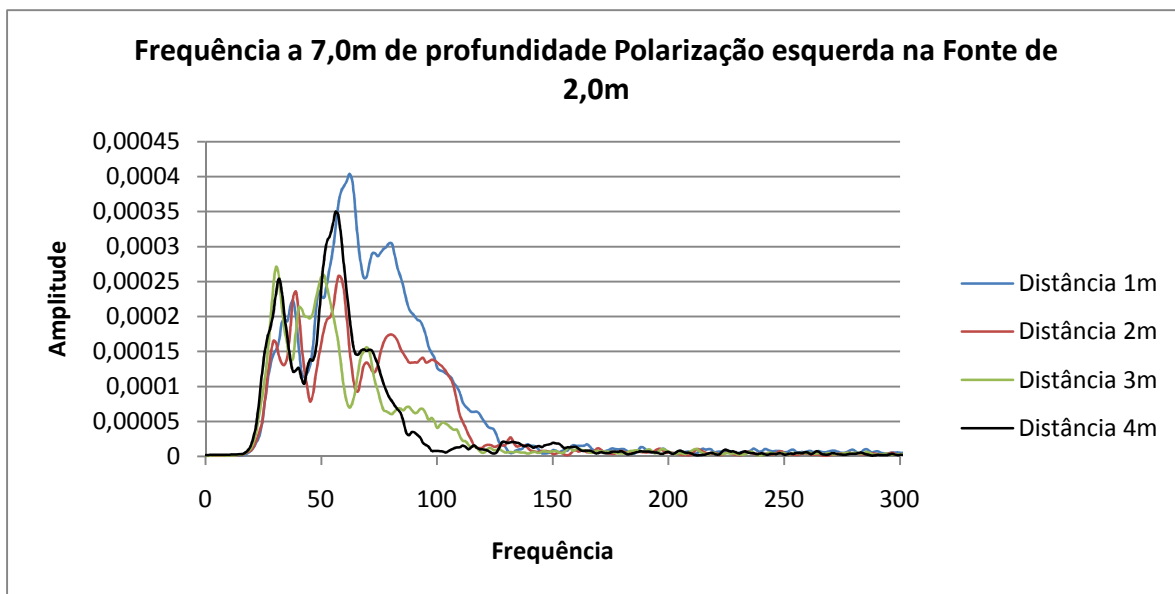


Figura 67 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 7,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

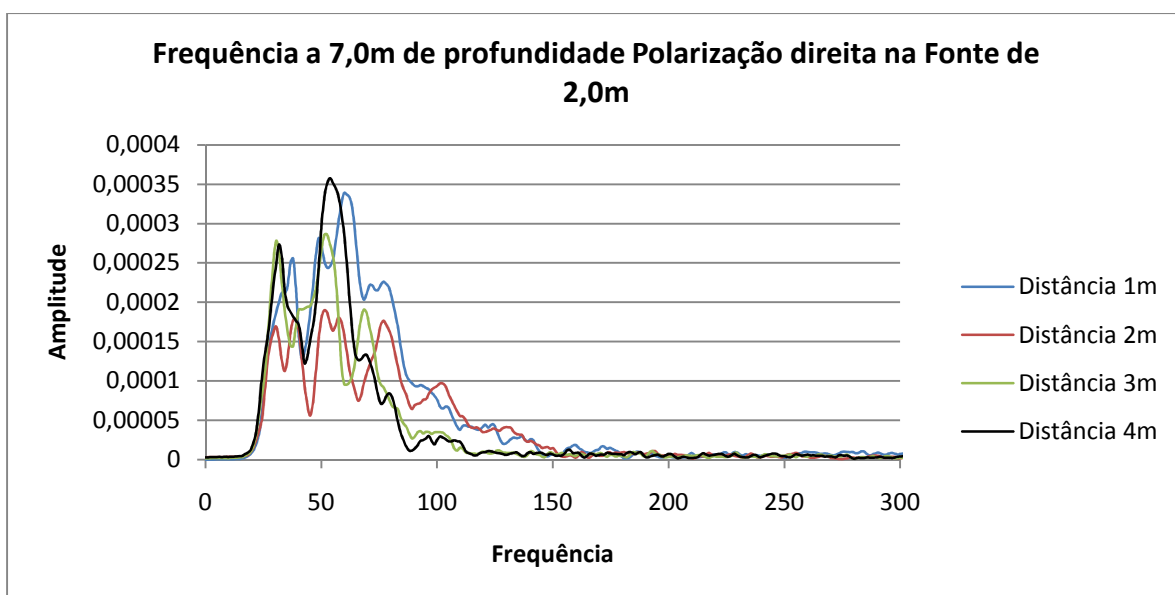


Figura 68 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 7,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

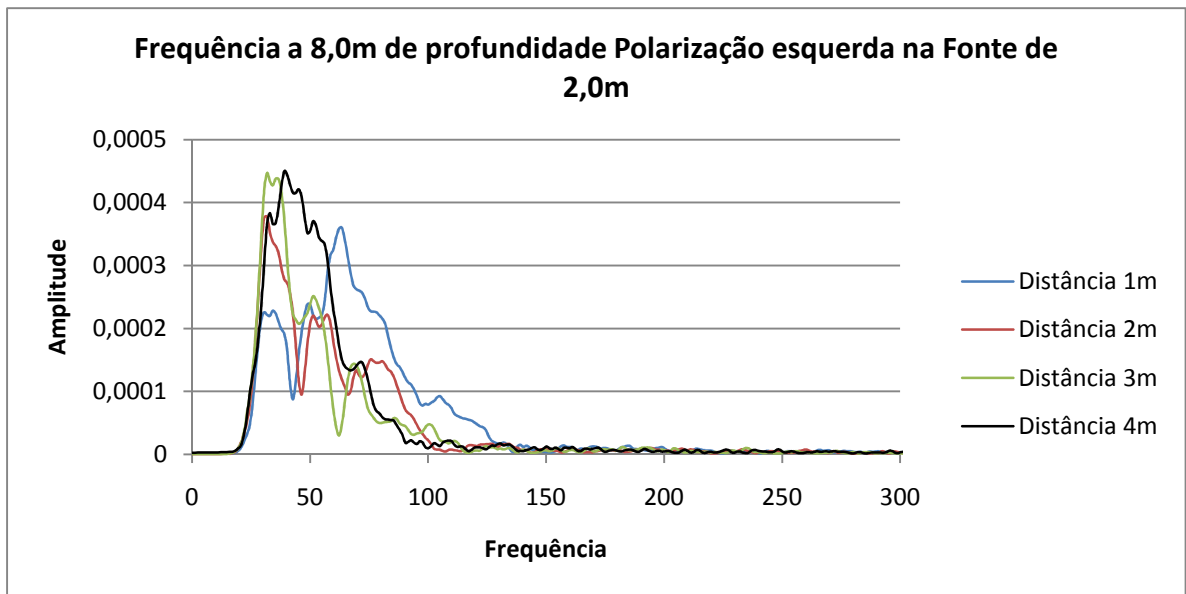


Figura 69 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 8,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

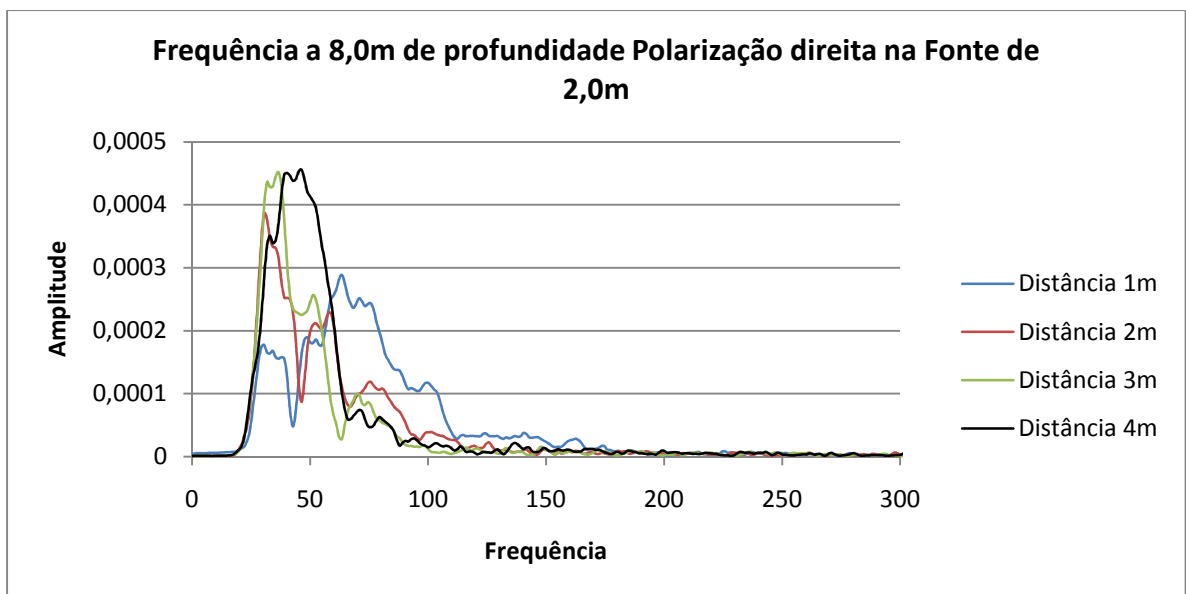


Figura 70 - Avaliação da amplitude e frequência de onda a 8,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

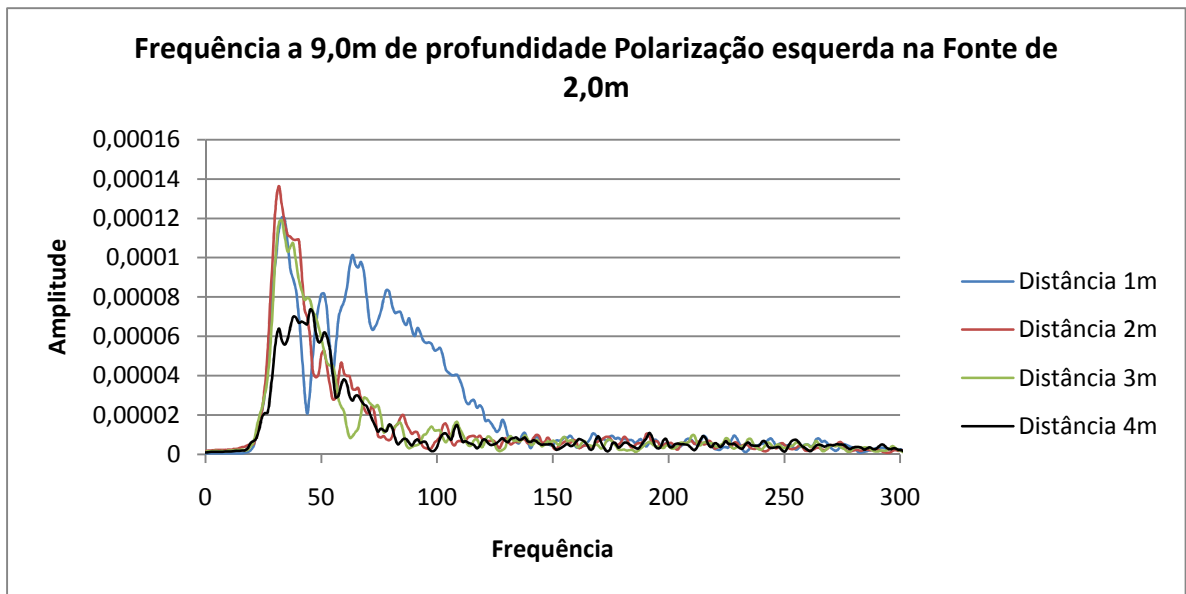


Figura 71 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 9,0m de profundidade, com polarização esquerda para as 4 distâncias na fonte de 2,0m

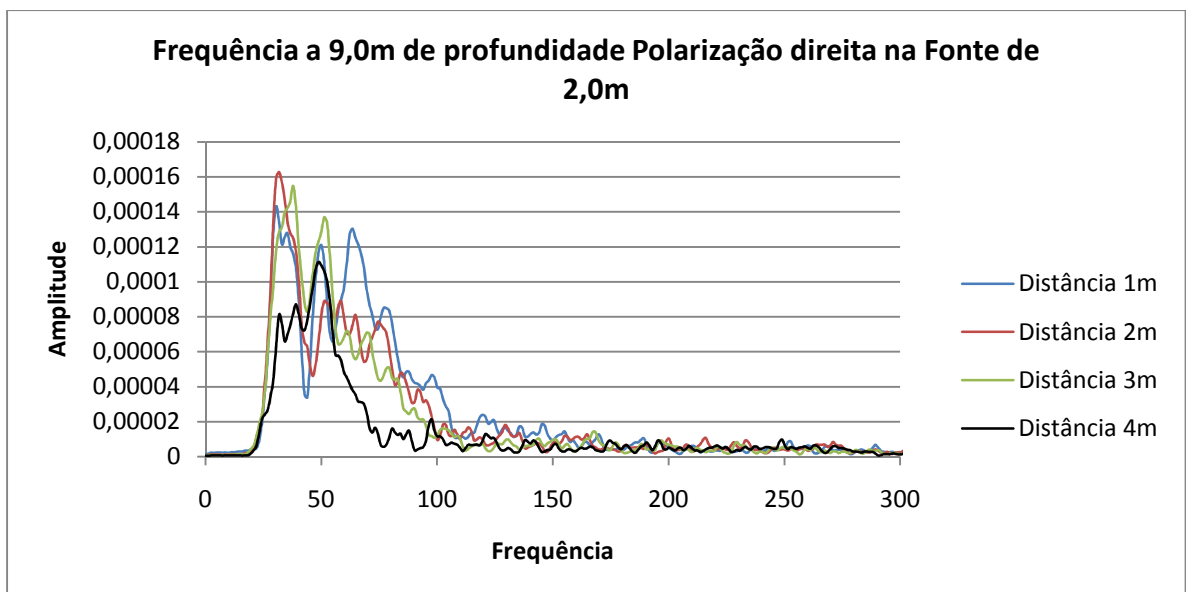


Figura 72 – Avaliação da amplitude e frequência de onda a 9,0m de profundidade, com polarização direita para as 4 distâncias na fonte de 2,0m